

УДК 620.92

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ И В СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОФИЗИКЕ

Басок Б.И., чл.-кор. НАН Украины, Давыденко Б.В., докт. техн. наук, Новиков В.Г., канд. техн. наук, Сороковой Р.Я.

*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина*

Работа посвящена оцінці інтенсивності і енергії сонячного випромінювання біля земної поверхні. Мета дослідження полягає в розробці математичної моделі сонячного випромінювання, необхідної при проектуванні пристроїв для відновлюваної енергетики, а також при проектуванні і будівництві будівель і споруд. Математична модель сонячного випромінювання реалізована в програмному коді Python. Програмний код дозволяє розраховувати інтенсивність сонячного випромінювання і сонячну інсоляцію у будь-який день року. Модель верифікована за результатами експериментальних досліджень сонячного випромінювання в Одеській області та за результатами власних експериментальних даних.

Работа посвящена оценке интенсивности и энергии солнечного излучения у земной поверхности. Цель исследования заключается в разработке математической модели солнечного излучения, необходимой при проектировании устройств для возобновляемой энергетики, а также при проектировании и строительстве зданий и сооружений. Математическая модель солнечного излучения реализована в программном коде Python. Программный код позволяет рассчитывать интенсивность солнечного излучения и солнечную инсоляцию в любой день года. Модель верифицирована по результатам экспериментальных исследований солнечного излучения в Одесской области и по результатам собственных экспериментальных данных.

The work is devoted to the estimation of the intensity and energy of solar radiation at the earth's surface. The aim of the research is to develop a mathematical model of solar radiation, necessary for the design of devices for renewable energy, as well as in the design and construction of buildings and structures. The mathematical model of solar radiation is realized in the Python code. The program code allows you to calculate the intensity of solar radiation and solar insolation on any day of the year. The model is verified by the results of experimental studies of solar radiation in the Odessa region and by the results of our own experimental data.

Библ. 17, рис. 7.

**Ключевые слова:** солнечное излучение, математическая модель, интенсивность излучения, инсоляция.

### *Введение*

Солнце излучает значительную энергию на Землю. Идеи использования этой энергии привели к созданию многих типов устройств, для преобразования солнечной энергии в полезные формы, главным образом в теплоту и в электричество.

Использование солнечной энергии в том или ином регионе зависит от сферы ее применения и интенсивности солнечной радиации. В Китае, например, и, в меньшей степени, Австралии, солнечная энергия широко используется для нагрева воды. В Европе правительственные стимулы способствовали использованию фотовольтаики и тепловых систем, как для нагрева воды, так и для отопления помещений. На Ближнем Востоке солнечная энергия используется для обессоливания воды.

В последнее время, все больше и больше внимания уделяется созданию домов пассивного типа и домов ноль энергии, что приводит к более широкому использованию солнечной энергии, в связи с ее экологическими и возобновляемыми свойствами. Замена ископаемого топлива на возобновляемые источники энергии также повышает уровень экономической независимости за счет снижения потребления ископаемых энергоносителей.

Производство энергии посредством солнечной энергетики оправдано в том случае, когда существует оценка возможностей, целесообразности и объемов использования солнечной энергии. Такая оценка требует определения теоретического и технически достижимого энергетического потенциала Солнца в конкретной точке на поверхности Земли и в произвольный момент времени.

Лучшей базой данных для оценки потенциала солнечной энергии будут долгосрочные измерения интенсивности солнечного излучения в районе предлагаемой установки солнечных систем. Однако ограниченное количество экспериментальных данных и достаточно длительная процедура их получения диктует необходимость разработки теоретических моделей солнечной радиации.

### *Основная цель статьи*

Цель работы заключается в разработке математической модели солнечного излучения на принимающей поверхности, расположенной на поверхности Земли. Такая модель необходима при проектировании и создании устройств возобновляемой энергетики, а также при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

### Теоретическая оценка потенциала энергии Солнца

Теоретическая оценка потенциала энергии Солнца в целом зависит от двух факторов: это расчет места положения Солнца на небесном своде в течении светлого времени суток в любой день года; и, непосредственно, модель солнечного излучения на поверхности Земли. Эти две составляющие "солнечного калькулятора" присутствуют практически во всех публикациях, посвященных оценки солнечного энергетического потенциала [1–6, 8, 9, 12–16].

Расчет места положения Солнца на небесном своде представляет собой полуэмпирическую методику определения угла падения солнечного луча на произвольно ориентированную принимающую поверхность солнечного коллектора или плоскости панелей фотовольтаики, поверхности ограждающих конструкций зданий и сооружений, или оконные проемы и т.д., расположенные на поверхности Земли.

#### 1. Солнечные углы и углы принимающей поверхности.

Методика предусматривает задание и расчет следующих углов [8, 10]:

**L – широта и LON – долгота** – места расположения принимающей поверхности (географические координаты расположения объекта);

**$\delta$  – солнечное склонение** – угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора, север положителен;  $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$ . Склонение может быть рассчитано по эмпирической формуле:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360^\circ \frac{n+284}{365}\right),$$

с достаточной для инженерных расчетов точностью, где  $n$  – номер дня года;

**$\beta$  – угол высоты Солнца**, угол между горизонтом и лучом к Солнцу,

$$\sin(\beta) = \cos(L)\cos(\delta)\cos(H) + \sin(L)\sin(\delta).$$

В полдень, при  $H=0$ , этот угол имеет максимальное значение и определяется формулой:

$$\beta_{\max} = 90^\circ - |L - \delta|.$$

**$\varphi$  – угол азимута Солнца**, угловое смещение проекции солнечного луча на горизонтальную плоскость от южного направления от точки расположения принимающей поверхности. При смещении к востоку от южного направления эти углы отрицательные, а к западу от юга – положительные.

$$\sin(\varphi) = \sin(H)\cos(\delta)/\cos(\beta),$$

$$\cos(\varphi) = (\cos(H)\cos(\delta)\sin(L) - \sin(\delta)\cos(L))/\cos(\beta),$$

где  $H$  – часовой угол.

**$\theta_z$  – угол солнечного зенита**, угол между вертикальной линией от принимающей поверхности и лучом к Солнцу, то есть этот угол является дополнением угла высоты Солнца;

**$\Psi$  – азимут поверхности**, угол отклонения проекции нормали к принимающей поверхности на горизонтальную плоскость от местного меридиана: ноль – южное направление, отклонение на восток отрицательный угол и положительный – отклонение на запад  $-180 \leq \gamma \leq 180$ .

**$\alpha$  – угол** между рассматриваемой плоскостью принимающей поверхности и горизонтальной плоскостью;  $0 \leq \alpha \leq 180$  ( $\alpha > 90$  означает, что принимающая поверхность имеет обращенный вниз компонент).

**$\theta$  – угол падения луча**, угол между солнечным лучом, падающим на принимающую поверхность и нормалью к этой поверхности:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta)\cos(\gamma)\sin(\alpha) + \sin(\beta)\cos(\alpha),$$

$$\gamma = \varphi - \Psi.$$

На рис. 1 схематически показаны основные солнечные углы из перечисленных выше.

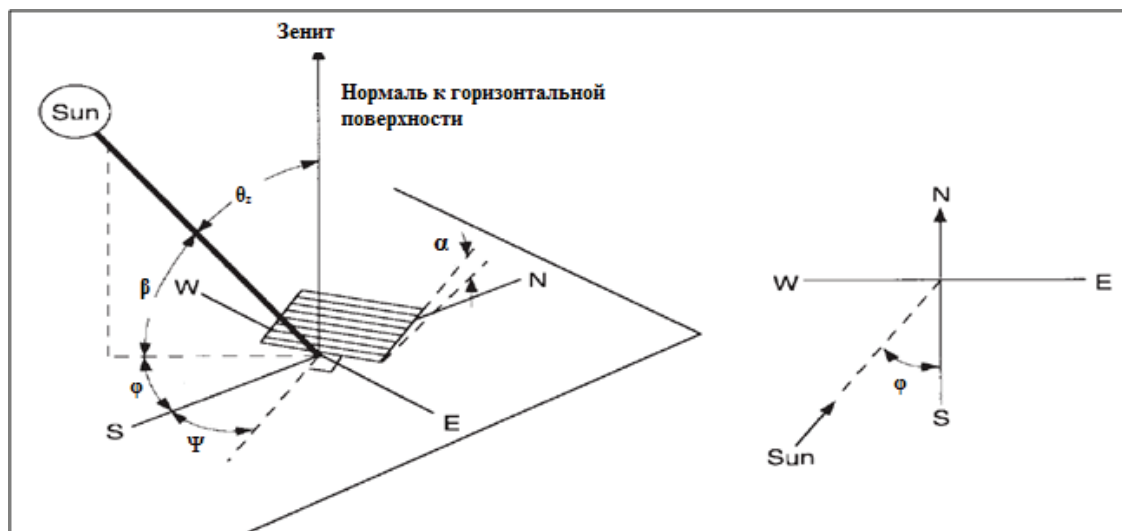


Рис. 1. Солнечные углы и углы принимающей поверхности.

## 2. Уравнение времени и солнечное время

Время, по всей видимости, – основной параметр на видимом угловом движении Солнца по небесному своду. Например, совершенно точно можно сказать, что в полдень Солнце пересекает меридиан наблюдателя.

Солнечное время – это время, используемое во всех соотношениях солнечных углов. Оно не совпадает с местным стандартным временем. Поэтому необходимо преобразовать стандартное местное время в солнечное время, применив две поправки [8, 10]. Во-первых, существует постоянная коррекция разности долготы между меридианом наблюдателя (долготой) и меридианом, на котором основано локальное стандартное время – меридиан часового пояса. Солнцу требуется 4 минуты, чтобы пересечь 1° долготы. Вторая поправка – это уравнение времени, которое учитывает возмущения скорости вращения Земли, которые влияют на время, когда солнце пересекает меридиан наблюдателя. Явное солнечное время определяется по формуле:

$$AST = LST + ET/60 + (LON - LSM)/15,$$

$AST$  – очевидное солнечное время;  $LST$  – местное стандартное время;  $LON$  – долгота наблюдателя (задается пользователем);  $LSM = 15TZ$  – долгота стандартного местного меридиана,  $TZ$  – временная зона, в часах (задается); если задается летнее время ( $DST$ ), то:  $LST = DST - 1$ ;

$$ET = 2.2918(0.0075 + 0.1868\cos(B) - 3.2077\sin(B) - 1.4615\cos(2B) - 4.089\sin(2B)) -$$

уравнение времени, где  $-B = 360 \frac{n-1}{365}$  – дневной угол.

Используя приведенные выше соотношения можно определить часовой угол:

**H – часовой угол** – угловое смещение Солнца к востоку или западу от местного меридиана, обусловленный вращением Земли вокруг оси со скоростью 15° в час:

$$H = 15(AST - 12),$$

$H=0$  в солнечный полдень;  $H>0$  после полудня;  $H<0$  утром до полудня.

Следует отметить, что приведенные выше соотношения, определяющие солнечные углы, не единственная методика. В [3] по утверждению авторов приводится более точный метод определения позиции Солнца на небосводе, основанный на Юлианском календаре в соответствии с *Astronomical Almanah* 1994, 1995, 1996, и 2004 годов.

## 3. Солнечное излучение на поверхности Земли

В настоящее время существует довольно много моделей солнечного излучения у поверхности Земли, например, в [7] проведен анализ 12 моделей оценки солнечного излучения, а в [11] рассматривается еще порядка 22 моделей. Общим для практически всех моделей является использование солнечной постоянной  $E_{sc}$  и относительной воздушной массы атмосферы  $m$ .

Значение солнечной постоянной определяется как интенсивность солнечного излучения на поверхности, нормальной к солнечным лучам, непосредственно за пределами земной атмосферы при среднем расстоянии

Земли от Солнца и составляет величину  $E_{sc} = 1367 \text{ Вт/м}^2$ . В связи с тем, что Земля вращается вокруг Солнца по эллиптической орбите внеземной лучистой поток от Солнца изменяется в течении года, достигая максимума в начале января (наименьшее расстояние от Земли до Солнца) и минимума – в начале июля. Для определения солнечного излучения на границе земной атмосферы существует эмпирическая зависимость [2]:

$$E_0 = E_{sc} \{1 + 0.033 \cos[360 \frac{(n-3)}{365}]\},$$

где  $n$  – день года: 1 – 1 января, 32 – 1 февраля и т.д.

Относительная воздушная масса ( $m$ ) – отношение массы атмосферы, через которую проходит луч Солнца, к массе атмосферы, через которую он проходил бы, если бы Солнце находилось в зените – другой параметр, который присутствует в моделях.

Таким образом, на уровне моря  $m = 1$ , когда Солнце находится в зените, и  $m = 2$  для зенитного угла  $\theta_z = 60$ . Для зенитных углов от 0 до 70 на уровне моря, в близком приближении,

$$m = 1 / \cos(\theta_z).$$

Существуют более точные эмпирические формулы определения  $m$  [8]:

$m = \exp(-0.0001184 \cdot h) / [\cos(\theta_z) + 0.50572(96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}]$ , где  $h$  – высота места принимающей поверхности над уровнем моря.

Кроме указанных выше параметров некоторые модели учитывают рассеяние солнечного излучения в атмосфере трехатомными газами, влагой, озоном, аэрозолями, загрязнением мелкими частичками (например, сажа дымовых потоков). Однако многие из них в той или иной степени связаны с конкретными местами на земной поверхности [12–16].

Из известных нам моделей для целей создания солнечного калькулятора по оценке интенсивности солнечного излучения было выбрано три модели, в которых нет прямой привязки к географическим координатам (месту расположения). Это модель ASHRAE 2001г. (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [4], модель ASHRAE 2009г. [2] и модель Hottel [8].

1. Модель ASHRAE 2001г.:

$$I_b = A \cdot e^{-\frac{B}{\sin(\theta_z)}},$$

$$I_d = C \cdot I_b \cdot F_{ss},$$

где  $I_b$  – прямое солнечное излучение;  $I_d$  – диффузное солнечное излучение;  $A$  – интенсивность излучения на границе атмосферы:

$$E_0 = 1.00011 + 0.03422 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma,$$

где  $\Gamma = 2\pi[(n-1)/365]$  – дневной угол [11].

$B$  – безразмерный коэффициент затухания широкополосного излучения в атмосфере,  $C$  – отношение диффузного излучения, падающего на горизонтальную поверхность при безоблачном небе, к прямому нор-

мальному излучению на поверхности Земли в ясный день;  $F_{ss} = (1 - \cos\alpha)/2$  – фактор угла наклона принимающей поверхности.

2. Модель Hottel [8]:

$I_{nb} = E_{sc} \cdot (1 + 0.033 \cos I) \cdot \tau_b$  – интенсивность солнечного излучения на поверхность нормальную к солнечным лучам;

$I_b = I_{nb} \cdot \cos\theta_z$  – интенсивность прямого солнечного излучения;

$I_d = I_b \cdot \tau_d$  – диффузное излучение;

где  $\tau_b = a_0 + a_1 \cdot \exp(-k/\cos(\theta_z))$  и  $\tau_d = 0.271 - 0.294 \cdot \tau_b$  – эмпирические коэффициенты [8].

3. Модель ASHRAE 2009г. [2]:

$I_{nb} = E_{sc} \exp[-\tau_b m^{ab}]$  – прямое солнечное излучение на принимающей поверхности, расположенной нормально к солнечным лучам;

$I_d = E_{sc} \exp[-\tau_d m^{ad}]$  – интенсивность диффузного излучения на горизонтальной поверхности;

где:  $\tau_{(b)}$  и  $\tau_{(d)}$  – прямая и диффузная оптическая псевдоглубина атмосферы (зависят от времени года);  $ab$  и  $ad$  – показатели экспоненты:

$$ab = 1.219 - 0.043\tau_b - 0.151\tau_d - 0.204\tau_b\tau_d,$$

$$ad = 0.202 - 0.852\tau_b - 0.007\tau_d - 0.357\tau_b\tau_d.$$

Выбор этих моделей, как указывалось выше, обусловлен тем, что в них не указано конкретное место использования. Кроме того, модели [2, 4] в разное время применялись в CFD пакетах ANSYSFluent, которые используются специалистами во всем мире.

В соответствии с приведенными выше соотношениями, определяющими положение Солнца по отношению к произвольно ориентированной принимающей поверхности, а также используя уравнения солнечного излучения на поверхности Земли в соответствии с моделями излучения, был разработан специальный программный код на языке Python, позволяющий рассчитать интенсивность и инсоляцию солнечного излучения в произвольный момент времени на произвольно ориентированной принимающей поверхности.

#### Результаты оценки потенциала энергии Солнца

На рис. 2-6 приведены результаты вычислений и их сравнение с экспериментальными данными для г. Одессы [17]:

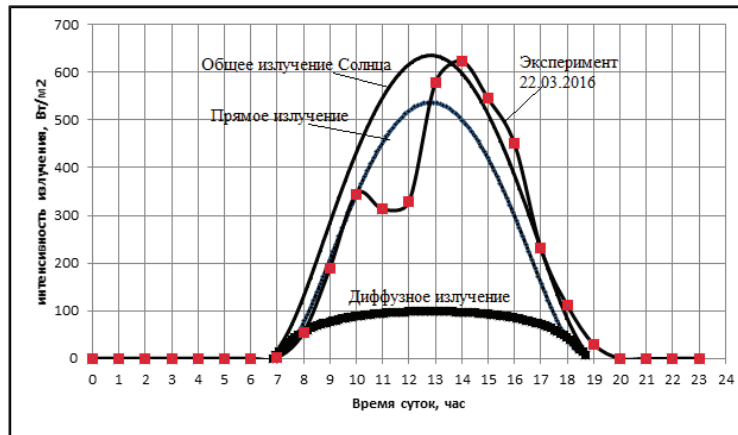


Рис. 2. Результаты расчетов интенсивности прямого, диффузного и общего солнечного излучения на горизонтальной поверхности в соответствии с моделью Hottel (г. Одесса).

Значительное отличие расчетных данных от результатов эксперимента обусловлено тем, что расчет проводился для безоблачного неба. Облачность небесного

свода обычно учитывается понижающим коэффициентом, влияющим на прямое солнечное излучение.

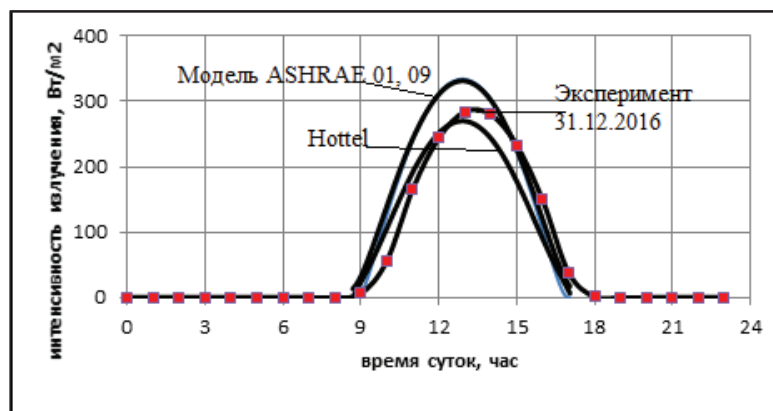


Рис. 3. Расчет и сравнение с экспериментом интенсивности солнечного излучения в декабре месяце (г. Одесса).

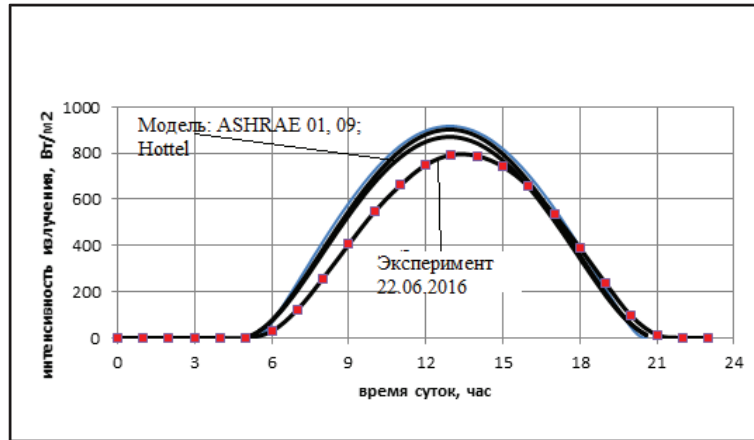


Рис. 4. Расчет и сравнение с экспериментом интенсивности солнечного излучения в июне месяце (г. Одесса – наибольшая продолжительность дня).

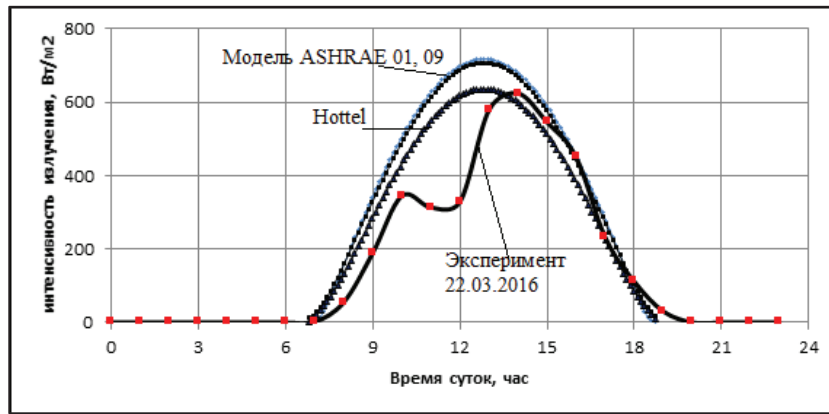


Рис. 5. Расчет и сравнение с экспериментом интенсивности солнечного излучения в марте месяце (г. Одесса – весеннее равноденствие).

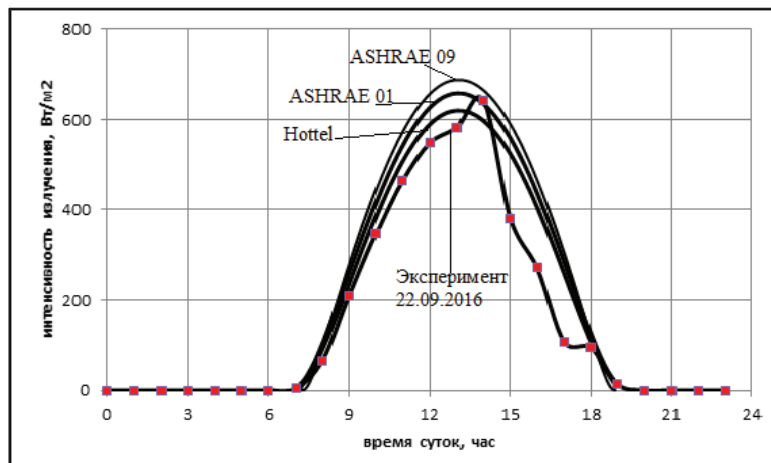


Рис. 6. Расчет и сравнение с экспериментом интенсивности солнечного излучения в сентябре месяце (г. Одесса – осеннее равноденствие).

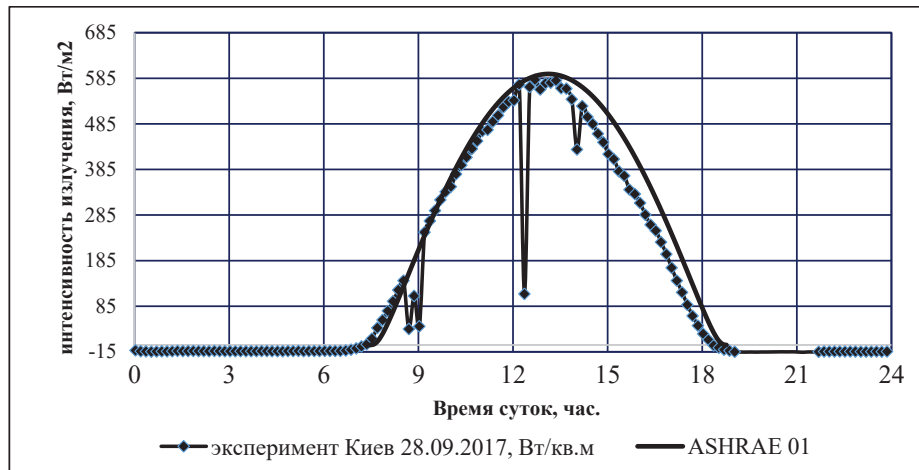


Рис. 7. Расчет и сравнение с экспериментом интенсивности солнечного излучения в сентябре месяце (г. Киев).

### Выводы

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показало достаточно хорошее совпадение по трем моделям в любое время года. Значительные резкие отличия экспериментальных данных от расчетных значений объясняется наличием облаков на небосводе в районе измерения в тот или иной момент времени.

Таким образом создан мощный инструмент по оценке интенсивности и инсоляции солнечного излучения в произвольный период времени и на произвольно ориентированной поверхности.

Вместе с тем модели оценки солнечной радиации не лишены недостатков. Известно, что общий поток солнечной радиации у поверхности Земли состоит из трех составляющих: прямого солнечного излучения, диффузного и отраженного от поверхности Земли солнечного излучения. Обычно альбедо поверхности очень маленькие и большинство моделей эту составляющую не учитывают. К таким моделям относятся модели солнечной радиации, рассмотренные в настоящей работе.

1. Clarke J A. Energy Simulation in Building Design 2nd Edition 2001, 362p.

2. ASHRAE Handbook – Fundamental: ASHRAE, 2009.

3. Reda I. and Andreas A. National Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. Technical Report. Revised January 2008

4. ASHRAE Handbook – HVAC applications. Atlanta (GA): ASHRAE, 2001.

5. Kuo Wei Liang, Chen Wu. Numerical simulation and visualization for building envelope thermal distribution analysis. International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 2011.

6. Gueymard Chris. Revising ASHRAE climatic data for design and standards – Part 2: Clear-sky solar radiation model. ASHRAE Transactions January 2013.

7. Noorian A. M., Morad I., Kamal G. A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. Renewable Energy 33 (2008) 1406–1412.

8. Duffie John A. Beckman William A. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition. 2013, 910p.

9. Myers Dary R. Solar radiation Practical Modeling for Renewable Energy Applications. 2013. 199p.

10. Szokolay S. V. Solar geometry. Second revised edition 2007.

11. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model. Applied Energy 69 (2001) 191–224

12. Shaltout M. A., Hassan A. H., Fathy A. M. Total suspended particles and solar radiation over Cairo and Aswan. Renewable Energy 23 (2001) 605–619.

13. Stewart D. A., Dudel H. P., Levitt L. J. Solar radiation in Saudi Arabia. Weapons Sciences Directorate Research, Development, and Engineering Center, DTIC Technical report rd-ws-93-6, June 1993.

14. Tyagi A. P. Solar radiant energy over India. India meteorological department ministry of earth sciences New Delhi, 2009, 4179p.

15. Doost A. K., Akhlaghi M. Estimation and Comparison of Solar Radiation Intensity by Some Models in a Region of Iran. Journal of Power and Energy Engineering, 2014, 2, 345–351.

16. Becker S. Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel. International journal of climatology, 2001, 21, 1561–1576.

17. Кравченко В. П., Кравченко С. В., Бондар І. В. Інструментальне визначення інсоляції в районі м. Одеси. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2016. № 1, с. 20–27.

## MODELING OF SOLAR RADIATION FOR USE IN RENEWABLE ENERGY AND IN CONSTRUCTION THERMAL PHYSICS

**Basok B.I., Davydenko B.V., Novikov V.G., Sorokovoy R.Ya.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine.

The present work is devoted to the evaluation of the intensity of solar radiation at the earth's surface. The main goal of the study is to develop a mathematical model of solar radiation, necessary for the design of renewable energy devices, as well as in the design and construction of buildings and structures.

The paper presents the results of the development of a mathematical model of solar radiation incident on a flat receiving surface located on the surface of the earth. The receiving surface can be located anywhere in the northern hemisphere, have an arbitrary orientation along the sides of the light and an arbitrary angle of inclination to the surface of the earth.

The mathematical model of solar radiation is implemented in the Python code, takes into account the relative length of the path of the sun's rays in the earth's atmosphere, the humidity of the air, the presence of various aerosols in the atmosphere, cloudiness. The program code allows you to calculate both the intensity of solar radiation and solar insolation on any day of the year. The model is verified by the results of experimental studies of solar radiation in the Odessa region.

References 17, fig. 7.

**Key words:** solar radiation, mathematical model, radiation intensity, insolation.

1. *Clarke J. A.* Energy Simulation in Building Design 2nd Edition 2001, 362p.

2. *ASHRAE Handbook* – Fundamental: ASHRAE 2009.

3. Reda I. and Andreas A. National Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. Technical Report. Revised January 2008.

4. *ASHRAE Handbook* – HVAC applications. Atlanta (GA): ASHRAE, 2001.

5. *Kuo Wei Liang, Chen Wu.* Numerical simulation and visualization for building envelope thermal distribution analysis. International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 2011.

6. *Gueymard Chris.* Revising ASHRAE climatic data for design and standards – Part 2: Clear-sky solar radiation model. ASHRAE Transactions January 2013.

7. *Noorian A. M., Morad I., Kamal G. A.* Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Renewable Energy* 33 (2008) 1406–1412.

8. *Duffie John A. Beckman William A.* Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition. 2013, 910p.

9. *Myers Dary R.* Solar radiation Practical Modeling for Renewable Energy Applications. 2013. 199p.

10. *Szokolay S. V.* Solar geometry. Second revised edition 2007.

11. *Wong L. T., Chow W. K.* Solar radiation model. *Applied Energy* 69 (2001) 191–224.

12. *Shaltout M. A., Hassan A. H., Fathy A. M.* Total suspended particles and solar radiation over Cairo and Aswan. *Renewable Energy* 23 (2001) 605–619.

13. *Stewart D. A., Dudel H. P., Levitt L. J.* Solar radiation in Saudi Arabia. Weapons Sciences Directorate Research, Development, and Engineering Center, DTIC Technical report rd-ws-93-6, June 1993.

14. *Tyagi A. P.* Solar radiant energy over India. India meteorological department ministry of earth sciences New Delhi, 2009, 4179p.

15. *Doost A. K., Akhlaghi M.* Estimation and Comparison of Solar Radiation Intensity by Some Models in a Region of Iran. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, 2, 345–351.

16. *Becker S.* Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel. *International journal of climatology*, 2001, 21, 1561–1576.

17. *Kravchenko V. P., Kravchenko E. V., Bondar I. V.* [Instrumental definition of insolation in the Odessa region]. *Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologiya*. 2016. № 1, p.20–27. (Ukr)

Отримано 04.12.2017  
Received 04.12.2017