

**Б.И. БАСОК** (orcid id: 0000-0002-8935-4248), **Б.В. ДАВЫДЕНКО** (orcid id: 0000-0001-8738-7612)  
**В.Г. НОВИКОВ** (orcid id: 0000-0003-1062-7336)

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

## СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ У ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Работа посвящена оценке интенсивности и энергии солнечного излучения на земной поверхности. Целью исследования является разработка математической модели солнечной радиации, необходимой для проектирования устройств для возобновляемых источников энергии, а также при проектировании и строительстве зданий и сооружений. Математическая модель солнечного излучения реализуется в коде Python. Программный код позволяет рассчитать интенсивность солнечной радиации и солнечной инсоляции в любой день года. Модель подтверждена результатами экспериментальных исследований солнечной радиации в Одесской области и результатами наших собственных экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** солнечная радиация, математическая модель, интенсивность излучения, инсоляция

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует довольно много моделей солнечного излучения у поверхности Земли. В [1], например, проведен анализ 12-и моделей оценки солнечного излучения, а в [2] рассматривается еще порядка 22 моделей. Общим для практически всех моделей оценки интенсивности солнечного излучения является использование солнечной постоянной, значение которой 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 лучистый 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 [3]:

$$E_0 = E_{sc} \left\{ 1 + 0,033 \cos \left[ 360^\circ \frac{(n-3)}{365} \right] \right\}$$

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

Другим важным параметром, который присутствует в моделях солнечного излучения, является относительная воздушная масса  $m$ . Она представляет собой отношение массы атмосферы, через которую проходит луч Солнца, к массе

атмосферы, через которую он проходил бы, если бы Солнце находилось в зените. Таким образом, на уровне моря  $m = 1$ , когда Солнце находится в зените, и  $m = 2$  для зенитного угла  $\theta_z = 60^\circ$ . Для зенитных углов от  $0^\circ$  до  $70^\circ$  вычисление  $m$  на уровне моря может производиться по приближенной формуле:

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

Существуют более точные эмпирические формулы для определения  $m$ . В [4] предлагается зависимость:

$$m = \frac{\exp(-0,0001184h)}{\left[ \cos(\theta_z) + 0,50572(96,07995 - \theta_z)^{-1,6364} \right]}$$

где  $h$  - высота места принимающей поверхности над уровнем моря.

Кроме указанных выше параметров, некоторые модели учитывают также рассеяние солнечного излучения в атмосфере трехатомными газами, влагой, озоном, аэрозолями, загрязнением атмосферы мелкими частичками (например, сажей дымовых потоков). Однако многие из них в той или иной степени связаны с конкретными местами на земной поверхности [5-8].

Из известных моделей для создания солнечного калькулятора по оценке интенсивности солнечного излучения были выбраны три модели, в которых нет прямой привязки к географическим координатам (месту расположения). Это модель ASHRAE 2001 г. (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [9], модель ASHRAE 2009 г. [3] и модель Hottel (1976 г.) [4]. Рассмотрим подробнее каждую из них.

## 1. МОДЕЛЬ ASHRAE 2001

Модель ASHRAE 2001 г. [9] предполагает расчет интенсивности прямого и рассеянного солнечного излучения. Для этого используются выражения:

$$I_b = A \cdot e^{-\frac{B}{\sin(\theta_z)}}, \quad I_d = C \cdot I_b \cdot F_{ss}$$

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

$$A = E_{sc} E_0$$

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221\cos(\Gamma) + 0,00128\sin(\Gamma) + 0,000719\cos(2\Gamma) + 0,000077\sin(2\Gamma)$$

где:  $\Gamma = 2\pi[(n-1)/365]$  - дневной угол [2],  $B$  - безразмерный коэффициент затухания широкополосного излучения в атмосфере,  $C$  - отношение диффузного излучения, падающего на горизонтальную поверхность при безоблачном небе, к прямому нормальному излучению на поверхности Земли в ясный день;  $F_{ss} = (1 - \cos(\alpha))/2$  - фактор угла наклона принимающей поверхности.

## 2. МОДЕЛЬ HOTTEL

В модели HOTTEL [4] интенсивность солнечного излучения, поступающего на поверхность, нормальную к солнечным лучам, предлагается рассчитывать по формуле:

$$I_{nb} = E_{sc} \cdot (1 + 0.033 \cos(\Gamma)) \cdot \tau_b$$

Для интенсивности прямого солнечного излучения, поступающего на поверхность с зенитным углом  $\theta_z$ , используется выражение:

$$I_b = I_{nb} \cdot \cos(\theta_z)$$

а диффузное излучение при этом рассчитывается по формуле:

$$I_d = I_b \cdot \tau_d$$

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 [4].

## 3. МОДЕЛЬ ASHRAE 2009

В модели ASHRAE 2009 г. [3] для расчета интенсивности солнечного излучения используются следующие зависимости:

- для прямого солнечного излучения на принимающей поверхности, расположенной нормально к солнечным лучам:

$$I_{nb} = E_{sc} \cdot \exp(-\tau_b m^{ab})$$

- для интенсивности диффузного излучения на горизонтальной поверхности:

$$I_d = E_{sc} \cdot \exp(-\tau_b m^{ad})$$

где  $\tau_b$  и  $\tau_d$  - прямая и диффузная оптическая псевдоглубина атмосферы (зависят от времени года);  $ab$  и  $ad$  - показатели экспоненты:

$$ab = 1,219 - 0,043 \tau_b - 0,151 \tau_d - 0,204 \tau_b \tau_d$$

$$ad = 0,202 - 0,852 \tau_b - 0,007 \tau_d - 0,357 \tau_b \tau_d$$

## 4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Выбор этих моделей, как указывалось выше, обусловлен тем, что они не привязаны к конкретной местности, в которой их можно использовать. Кроме того, модели ASHRAE [3, 9] в разное время применялись в CFD пакетах ANSYS Fluent, которые используются специалистами во всем мире.

В соответствии с приведенными выше моделями солнечного излучения у поверхности Земли, был разработан программный код на языке Python, позволяющий рассчитать в произвольный момент времени интенсивность солнечного излучения и в любом временном интервале солнечную инсоляцию на произвольно ориентированной принимающей поверхности.

На рисунках 1, 2 приведены результаты вычислений интенсивности солнечного излучения и их сравнение с экспериментальными данными, полученными для Одессы [10] (рис. 1) и Киева (рис. 2).

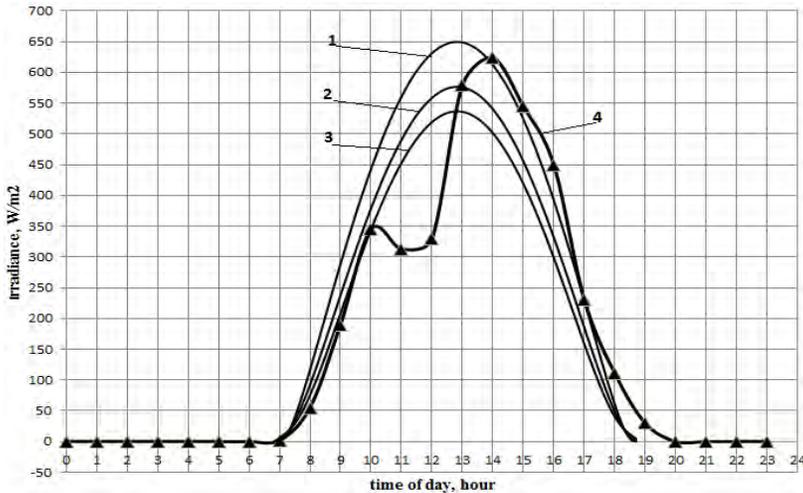


Рис. 1. Расчет и сравнение с экспериментом интенсивности солнечного излучения в марте (весеннее равноденствие, для Одессы: 1 - модель ASHRAE 01; 2 - модель ASHRAE 09; 3 - модель Hottel 1976 г., 4 (▲-точки) - результаты эксперимента в Одессе (выпадение точек в 11 и в 12 часов объясняется появлением облачности)

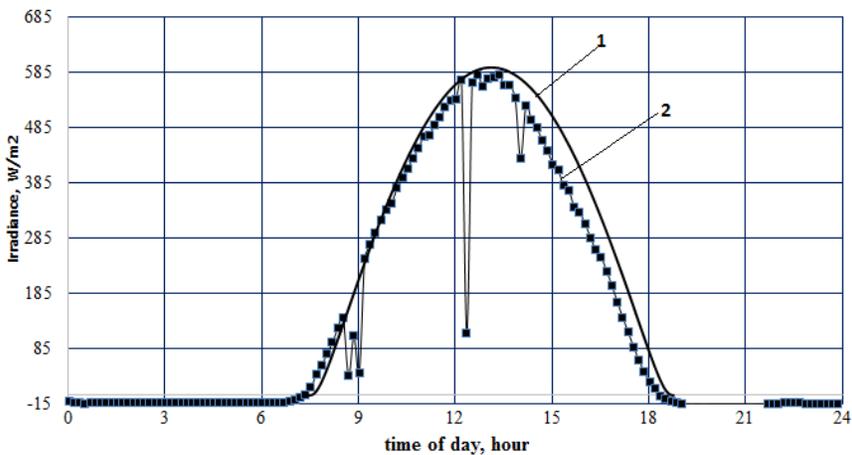


Рис. 2. Расчет и сравнение с экспериментом интенсивности солнечного излучения 28.09.2017, г. Киев: 1 - модель ASHRAE 01; 2 - результаты эксперимента г. Киев

Некоторое 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.

В целом сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показало достаточно хорошее их совпадение по модели ASHRAE 2001 г. Некоторые отличия экспериментальных данных от расчетных значений объясняется наличием облаков на небосводе в районе измерения в тот или иной момент времени.

В таблице 1 приведены расчетные значения солнечной инсоляции за год для Одессы в сравнении с экспериментальными данными [10] и данными NASA [11] для разных углов наклона, ориентированной на юг принимающей поверхности.

Таблица 1. Годовые экспериментальные и расчетные значения солнечной инсоляции в районе г. Одесса

Угол наклона принимающей поверхности, градусы	0	30	60	90
Расчетные значения инсоляции за год в районе. Одесса [kWh/m <sup>2</sup> ]	1129	1446	1374	923
Значение солнечной инсоляции за год по данным NASA [11] [kWh/m <sup>2</sup> ]	1287	1428	1296	971
Эксперимент, Одесса [10] [kWh/m <sup>2</sup> ]	1149			

## ВЫВОДЫ

Приведенные данные свидетельствуют о достаточно хорошем совпадении расчетных и экспериментальных значений солнечной инсоляции. Таким образом, разработанный алгоритм позволяет с достаточной точностью рассчитать интенсивность солнечного излучения и солнечную инсоляцию в произвольный период времени на произвольно ориентированной поверхности в любой точке на поверхности Земли.

Следует, однако, отметить, что предлагаемые модели для оценки интенсивности солнечного излучения имеют некоторые недостатки. 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 отраженную составляющую не учитывают, особенно при расчетах для горизонтальной поверхности. К таким моделям относятся модели солнечной радиации, рассмотренные в настоящей работе.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Noorian A.M., Morad I., Kamal G.A., Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces, *Renewable Energy* 2008, 33, 1406-1412.
- [2] Wong L.T., Chow W.K., Solar radiation model, *Applied Energy* 2001, 69, 191-224.
- [3] ASHRAE Handbook Fundamental, 2009.
- [4] Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth Edition. 2013, 910.
- [5] 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.
- [6] Tyagi A.P., Solar Radiant Energy over India. India Meteorological Department Ministry of Earth Sciences, New Delhi 2009, 418.
- [7] 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.
- [8] Becker S., Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel, *International Journal of Climatology* 2001, 21, 1561-1576.
- [9] ASHRAE Handbook - Fundamental, 2001.
- [10] Kravchenko V.P., Kravchenko E.V., Bondar I.V., Instrumentalnyye viznacheniya insolyatsiyi v rayoni m. Odesy, *Enerhetika: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya* 2016, 1, 20-27.
- [11] NASA - elektronnyy resurs: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi/>

## SOLAR RADIATION IN THE EARTH'S SURFACE

**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.**

**Keywords: solar radiation, mathematical model, radiation intensity, insolation**