

А. К. Ильин

ОЦЕНКА ЭКСЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

А. К. Pyin

ESTIMATION OF SOLAR RADIATION EXERGY

Рассмотрены методы оценки эксергии солнечной радиации. Предлагается метод расчета этой эксергии по температуре излучения атмосферы. Приведены примеры.

Ключевые слова: солнечная радиация, эксергия, методы оценки, радиация атмосферы, примеры.

Estimation methods of solar radiation exergy are considered in the paper. The offered calculation method of this exergy is based on the temperature of atmosphere radiation. Some examples are shown.

Key words: solar radiation, exergy, estimation methods, radiation of atmosphere, examples.

Теоретические основы для практического использования солнечной энергии, в том числе – в крупных и маломасштабных установках в стационарной и автономной энергетике и на разных объектах различных видов транспорта (морского, автомобильного и др.) изложены в [1–18]. Известны примеры опытного использования солнечных установок на крупных морских судах.

Различные аспекты проблемы рассматриваются в [1–18] на основе как энергетического, так и эксергетического анализа. Однако вопросам эксергетического анализа уделяется значительно меньше внимания [1, 11, 14, 17, 18], кроме того, данные об эксергии немногочисленны и недостаточно определены.

Исходные положения

Основными исходными данными для общего эксергетического анализа [8–11, 14, 17, 18] являются сведения о потоках тепловой энергии и значениях температуры в характерных точках схем, процессов и т. п.

Для солнечной радиации такими данными являются:

- температура на поверхности Солнца – до 6 000 °С;
- степень черноты поверхности Солнца при оценке потока солнечной радиации принимается $\epsilon \approx 1$;
- температура в космосе = –50 °С (223 К);
- средняя температура приповерхностного слоя атмосферы [4] $T_{\text{атм}} = 15$ °С (288 К), на поверхности слоя атмосферы = –50 °С (223 К);
- средняя плотность потока солнечной радиации на поверхности атмосферы (солнечная постоянная) составляет 1 370 Вт/м² [4, 5, 10 и др.];
- средняя плотность потока солнечной радиации после прохождения атмосферы (у поверхности Земли) составляет 1 000 Вт/м² [4, 5, 15];
- средняя условная температура, соответствующая потоку радиации 1 000 Вт/м² на поверхность Земли – $T_{a,\text{усл}}$, т. е. – «температура излучения» (определяется, см. ниже).

Некоторые эксергетические характеристики

Существует ряд работ, посвященных определению непосредственно эксергии солнечной радиации. В [1] предлагается эмпирическая зависимость для определения плотности потока эксергии суммарной солнечной радиации на поверхность солнечных тепловых коллекторов перпендикулярную солнечным лучам:

$$ex_s = \psi \cdot q_{\text{пад}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{пад}}$ – плотность суммарной солнечной радиации, Вт/м²; коэффициент

$$\psi = 1 - 0,0002314 \cdot T_0, \quad (2)$$

T_0 – абсолютная температура окружающей среды, К.

Таким образом, при $q_{\text{пад}} = 1\,000 \text{ Вт/м}^2$ (см. выше) и при $T_{\text{атм}} = 288 \text{ К}$ и 263 К (вариант) ex_s составит, по (1), соответственно 933 и 939 Вт/м^2 .

Следует отметить при расчетах по формуле (1) слабую зависимость эксергии от $T_{\text{атм}}$, а также большую величину ex_s при существующей умеренной разности значений температуры $T_{\text{а.усл}}$ и $T_{\text{атм}}$ в множителе $(1 - T_{\text{атм}}/T_{\text{а.усл}})$, обычно применяющемся при определении эксергии теплового потока, т. е. $(1 - T_{\text{атм}}/T_{\text{а.усл}}) < \psi$ [8, 14, 17, 18].

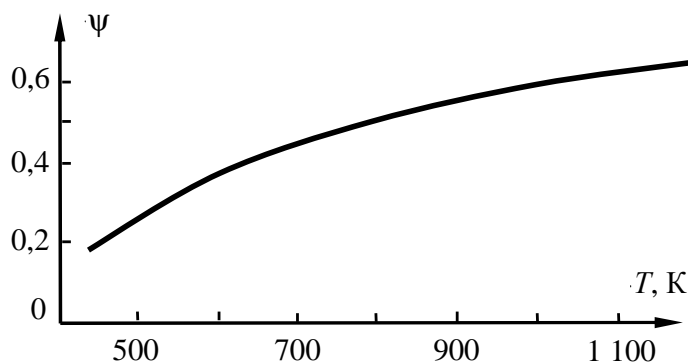


Рис. 1. Зависимость отношения плотности потока эксергии излучения к плотности потока излучения при температуре окружающей среды 300 К (фрагмент рис. по [15, с. 237])

В [14 и 17, с. 242] вычислена в первом приближении величина плотности потока эксергии солнечной радиации на перпендикулярную потоку поверхность атмосферы с учетом собственного излучения поверхности Солнца при температуре его поверхности $6\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ и степени черноты $\epsilon = 1$, при определенной геометрии и известных размерах системы Солнце – Земля и при температуре окружающей среды $T_{\text{атм}} = 300 \text{ К}$:

$$ex_{s,\text{атм}} = 1\,480 \text{ Вт/м}^2. \quad (3)$$

Очевидно, что пока можно считать полученную в [14, 17] величину ex_s по (3) завышенной, т. к. в данном случае отношение плотности потока эксергии излучения к плотности теплового потока должно быть меньше единицы, т. е. должно соответствовать обычному условию при оценке эксергии теплового потока: $ex_q < q$. Необходимо также отметить, что величина температуры окружающей среды $T_{\text{атм}} = 300 \text{ К}$ в данном случае принята неточно, т. к. температура на поверхности атмосферы близка к минус $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (223 К). Однако ее влияние на ex_s в методике и расчетах авторов невелико.

Можно использовать для оценок также соотношение

$$ex_s = \psi \cdot q_{\text{пад}} \quad (4)$$

при вычислении удельной эксергии солнечной радиации, падающей на поверхность Земли после прохождения через атмосферу, используя общепринятую (см. выше) величину $q_{\text{пад}} = 1\,000 \text{ Вт/см}^2$ и приведенную в [14, 17] графическую зависимость $\psi = f(T)$ (рис. 1). Но для этого нужно знать, кроме известной величины $q_{\text{пад}}$, температуру, которая является аргументом на рис. 1.

Оценка температуры $T_{\text{а.усл}}$

Для оценки можно использовать температуру, соответствующую потоку энергии $q_{\text{пад}} = 1\,000 \text{ Вт/м}^2$ после прохождения излучения через атмосферу, т. е. условную «температуру излучения» (термин Д. Дэвинса, 1985). Обозначим эту температуру через $T_{\text{а.усл}}$. Тогда, из зависимости для энергии собственного излучения слоя атмосферы при $T_{\text{а.усл}}$,

$$q_{a,\text{собств}} = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{\text{а.усл}}^4. \quad (5)$$

При степени черноты системы $\epsilon_c = 0,56$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана и $q_{a.собств} = q_{пад} = 1\,000$ Вт/м² получим $T_{a.усл} = 421$ К (148 °С). Здесь использована степень черноты излучающего слоя атмосферы, которую определяем с учетом содержания в атмосфере только паров воды и углекислого газа, как основных компонентов.

В соответствии с литературными данными по свойствам поглощающих газовых сред [4, 12, 13, 16, 17 и др.] можно принять степень черноты, обусловленную наличием паров воды, $\epsilon_{H_2O} \approx 0,4$, и то же для углекислого газа – $\epsilon_{CO_2} \approx 0,2$ (ϵ_{H_2O} и ϵ_{CO_2} зависят от концентрации веществ и других параметров). Тогда, используя соотношение [12, 13, 16]

$$\epsilon_c = 1 / \left[(1/\epsilon_r) + (1/\epsilon_{зм}) - 1 \right], \quad (6)$$

где $\epsilon_r = \epsilon_{H_2O} + \epsilon_{CO_2}$, а $\epsilon_{зм} = 0,9$ (принято по рекомендуемой степени черноты поверхности Земли (0,9–1,0) [4]), получим $\epsilon_c = 0,56$ для подстановки в формулу (5). При этом в дальнейшем необходимо более подробно обосновать принятые величины ϵ_{H_2O} и ϵ_{CO_2} .

Там же [17, с. 243] вычислена эксергия солнечной радиации, падающей на поверхность Земли перпендикулярно к поверхности приемника, при $T_{атм} = 300$ К: $ex_s = 1\,274$ Вт/м², т. е. автотрами получено отношение $ex_s/q_{пад} = (1\,274/1\,000) > 1$, что противоречит общепринятому [18]:

$$ex < q.$$

Об эксергии солнечной радиации

Кроме способов, предложенных в [1] и [14, 17], есть возможность вычислить поток эксергии на поверхность Земли, принимая, как отмечено выше, температуру окружающей среды равной средней температуре приповерхностного слоя атмосферы $T_{атм} = 288$ К и условную температуру излучения на поверхность Земли $T_{a.усл} = 421$ К (см. выше):

– по обычной для эксергетического анализа формуле [9, 18]

$$ex_s = q_{пад} \cdot \left(1 - T_{атм} / T_{a.усл} \right) = 316 \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

и тогда получаем $ex_s/q_{пад} = 0,684$;

– по соотношению

$$ex_{нов} = \psi \cdot q_{пад} = 130 \text{ Вт/м}^2, \quad (8)$$

где $\psi = 0,13$ по рис. 1 [7, с. 237] при температуре излучения 421 К.

В качестве сравнения можно привести эксергию потока излучения слоя водяного пара при температуре 473 К и $T_{атм} = 300$ К: $ex_{H_2O} = 281$ Вт/м² [17, с. 244].

Особенности потоков теплоты и эксергии, примеры

На рис. 2 в качестве примера показано для различных условий изменение некоторых параметров солнечной радиации: 1. Максимальная плотность потока солнечной радиации имеет место в полдень и в течение около двух часов до и после него. 2. Снижение плотности потока радиации, которое имеет место в первой и второй половине дня, в настоящее время объясняют увеличением «оптической массы атмосферы» [5, 15], т. е. увеличением расстояния, которое проходят солнечные лучи при меньших углах высоты солнца над горизонтом.

Линия 2 на рис. 2, где шкала m_τ / m_0 существенно неравномерна в области $>1,5$, т. е. при значительном уменьшении радиации соответствует приближенной зависимости [5]:

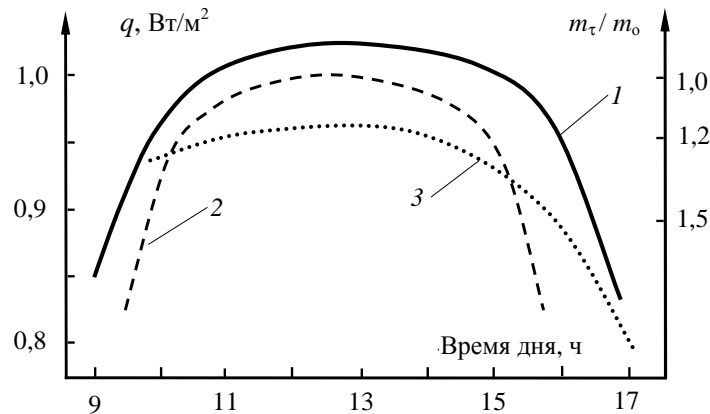


Рис. 2. Изменение параметров солнечной радиации в течение дня: 1 – плотность потока прямой солнечной радиации по результатам измерений автора в экваториальном районе Индийского океана в ясный день [7]; 2 – относительная оптическая масса атмосферы в зависимости от угла высоты Солнца над горизонтом в течение дня по формуле (9) при $m_0 = 1$; 3 – расчетная плотность потока прямой солнечной радиации при ясном небе на широте 45° (на 21 июня при ясном небе [6])

$$m_\tau / m_0 = 1 / \cos \gamma, \quad (9)$$

где $m_\tau = m(\tau)$, $m_0 = 1$ (в южных широтах на уровне моря) соответствует минимальной толщине слоя атмосферы; γ – угол высоты Солнца над горизонтом, $\gamma = \gamma(\tau)$; τ – время дня.

Аналогичная зависимость приведена в [17]:

$$m_\tau / m_0 = 1000 \cdot (1000 / 1370)^{m_\tau / m_0 - 1},$$

результаты расчетов по которой несколько отличаются от результатов по (9) при низких углах высоты Солнца.

Некоторым критерием оценки приведенных данных могут быть, в качестве примера, вычисленные значения величины эксергии при работе опытных и промышленных солнечных водонагревательных установок при следующих параметрах [10, 11]: $q_{\text{пад}} = 980 \text{ Вт/м}^2$ в полдень, $T_{\text{а.усл}} = 421 \text{ К}$, $T_{\text{атм}} = 293 \text{ К}$, температура воды на выходе нагревателей $T_{\text{вых}} = 293 \text{ К}$. Тогда по формуле (7) – $ex_s = 288 \text{ Вт/м}^2$, и полезная эксергия составит при полезной плотности теплового потока $q_{\text{полезн}} = 650 \text{ Вт/м}^2$

$$ex_{\text{полезн}} = q_{\text{пад}} \cdot (1 - T_{\text{вых}} / T_{\text{а.усл}}) = 182 \text{ Вт/м}^2,$$

а эксергетический КПД нагревателей $\eta_{ex} = ex_{\text{полезн}} / ex_s = 0,603$. Отношение эксергетического КПД нагревателей (0,603) к тепловому КПД ($650 / 980 = 0,66$) составляет 0,91. Это несколько больше реальных величин [11] вследствие неучета рассеянной радиации при определении ex_s .

Выводы

Таким образом, можно обсуждать следующие величины эксергии солнечной радиации, падающей на поверхность Земли:

- по (1) $ex_s = 933 \text{ Вт/м}^2$, $\psi = 0,93$;
- по (7) $ex_s = 316 \text{ Вт/м}^2$, $\psi = 0,684$;
- по [17] $ex_s = 1\,274 \text{ Вт/м}^2$, $\psi = 1\,274$;
- по [17] $ex_s = 1\,304 \text{ Вт/м}^2$ при $\psi = 0,13$ по рис. 1.

С учетом замечаний в тексте статьи можно считать величины $1\,274$ и $1\,304 \text{ Вт/м}^2$ завышенными, а величину 130 Вт/м^2 – очевидно заниженной.

В целом приведенные величины по потоку эксергии солнечного излучения, падающему на Землю, недостаточно определены и требуют внимания разработчиков данной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авезов Р. Р.* Эксергетическая эффективность плоских солнечных тепловых коллекторов // Гелиотехника. – 1999. – № 5. – С. 66–72.
2. *Алферов Ж. И.* Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. Чтения памяти А. Ф. Иоффе. – Л.: Наука, 1983. – С. 4–21.
3. *Алхасов А. Б.* Возобновляемая энергетика. – М.: Физматлит, 2010. – 256 с.
4. *Будыко М. И.* Глобальная экология. – М.: Мысль, 1977. – 328 с. (Раздел – Преобразование солнечной радиации).
5. *Солнечная энергетика* / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Малинин. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 276 с. (Раздел – Солнечное излучение на земле и в космосе).
6. *Взаимосвязь между полем гелиостатов и термодинамической системой солнечной станции башенного типа* / Б. Дессю, Ш. Мерсье, Ф. Фарабо, Ж. Абатю // Солнечная энергетика: сб. ст. – М.: Мир, 1979. – С. 93–113.
7. *Ильин А. К., Волков А. В.* Экспериментальное исследование солнечного нагрева испаряющей и неиспаряющейся жидкостей // Использование тепловой энергии океана. – Владивосток: ДВО РАН, 1989. – С. 81–89.
8. *Ильин А. К.* Максимальная работа в процессах преобразования энергии. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. – 35 с.
9. *Ильин А. К.* Формулы для эксергии // Материалы докл. Рос. нац. симпоз. по энергетике. – Т. 1. – Казань: КГЭУ, 2001. – С. 193–196.
10. *Ильин А. К.* Коэффициент использования эксергии солнечных водонагревателей // 5 Минский Междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ. – Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2004. – С. 294–295.
11. *Ильин Р. А.* Сравнительная термодинамическая эффективность использования возобновляемых источников энергии // Технические проблемы Мирового океана: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Владивосток: ДВО РАН, Ин-т проблем морских технологий, 2005. – С. 317–318.
12. *Крейт Ф., Блэк У.* Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с. (Раздел – Солнечное излучение).
13. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука (СО), 1970. – 660 с. (Раздел – Теплообмен излучением в прозрачных и поглощающих средах).
14. *Петела Р.* Эксергия тепловой радиации // Вопросы термодинамического анализа (эксергетический метод): сб. ст. – М.: Мир, 1965. – С. 222–237.
15. *Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России* / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г. А. Борисов и др. / под ред. П. П. Безруких. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с. (Раздел – Солнечная энергия).
16. *Спэрроу Э. М., Сесс Р. Д.* Теплообмен излучением. – Л.: Энергия (ЛЮ), 1971. – 294 с.
17. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 280 с. (Раздел – Эксергия солнечной радиации при допущении, что поверхность Солнца абсолютно черная).
18. *Эксергетические расчеты технических систем* / В. М. Бродянский, Г. П. Верхивкер, С. В. Дубовский и др. Справочное пособие / под ред. В. М. Бродянского / ИТТФ Украины. – Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с. (Раздел – Оценка энергетических и неэнергетических природных ресурсов).

Статья поступила в редакцию 8.09.2011

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ильин Альберт Константинович – Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой «Теплоэнергетика»; зав. Лабораторией нетрадиционной энергетики Отдела энергетических проблем Саратовского научного центра Российской академии наук (при Астраханском государственном техническом университете); тел.: 8 (8512) 546-243, 614-282.

Ilyin Albert Konstantinovich – Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Science, Professor; Head of the Department "Heat-and-Power Engineering"; Chief of the Laboratory of Alternative Power Engineering, Power Engineering Department of Saratov Research Center of the Russian Academy of Science (attached to Astrakhan State Technical University); tel. 8 (8512) 546-243, 614-282.