



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ МЕТЕОСОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Москаленко¹ Н.И., Ахметшин^{1,2,*} А.Р., Сафиуллина¹ Я.С.,
Додов¹ И.Р., Хамидуллина¹ М.С.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Резюме. ЦЕЛЬ. Определить воздействие метеосостояния атмосферы на эффективность функционирования солнечных тепловых и электрических станций. Моделирование молекулярного поглощения солнечного излучения атмосферой. Моделирование оптических характеристик газовых компонентов атмосферы, атмосферного аэрозоля и облаков. МЕТОДЫ. Метод численного моделирования приходящих потоков солнечного излучения в спектральной области их функционирования для определения эффективности солнечных тепловых и электрических станций. Потоки солнечного излучения вычисляются методом сложения слоев в многопотоковом приближении с учетом многоярусного облачного покрова и вероятности перекрытия небосвода облаками. Поглощение излучения газовой фазой атмосферы учитывается методом эквивалентной массы в неоднородной атмосфере. Оптические характеристики дисперсной фазы атмосферы вычисляются с применением теории Ми. РЕЗУЛЬТАТЫ. Электронная база данных учитывает влияние антропогенного воздействия на потоки падающего на подстилающую поверхность солнечного излучения. Разработанное моделирование учитывает влияние влажности на оптические характеристики атмосферного аэрозоля и его многокомпонентный состав в зависимости от места локализации электрической станции. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Обобщена информация необходимая для численного моделирования метеовоздействий на функционирование солнечных тепловых и электрических станций. При вычислении потоков солнечного излучения учитывают прямые засветки световоспринимающей поверхности солнечным излучением, рассеянное излучение атмосферным аэрозолем и облаками.

Ключевые слова: численное моделирование, солнечные тепловые станции, солнечные электрические станции, солнечное излучение, оптическая характеристика атмосферного аэрозоля и облаков.

Для цитирования: Москаленко Н.И., Ахметшин А.Р., Сафиуллина Я.С., Додов И.Р., Хамидуллина М.С. Численное моделирование воздействий метеосостояния атмосферы на эффективность функционирования солнечных тепловых и электрических станций // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 86-99. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-86-99.

SIMULATION OF THE IMPACT OF THE ATMOSPHERIC WEATHER STATE ON THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF SOLAR THERMAL AND POWER PLANTS

NI. Moskalenko¹, AR. Akhmetshin^{1,2,*}, YaS. Safiullina¹,
I.R. Dodov¹, M.S. Khamidullina¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, dr.akhmetshin@ieee.org

Abstract. THE PURPOSE. Determine the impact of the meteorological state of the atmosphere on the efficiency of the functioning of solar thermal and power plants. Modeling the molecular absorption of solar radiation by the atmosphere. Modeling the optical characteristics of the gaseous components of the atmosphere, atmospheric aerosol and clouds. METHODS. A method for numerical modeling of incoming solar radiation fluxes their functioning to

determine the efficiency of solar thermal and power plants. The solar fluxes are calculated by stacking layers in a multi-stream approximation, taking into account the multi-tiered cloud cover and the probability of overlapping the sky with clouds. The absorption of radiation by the gaseous phase of the atmosphere is taken into account by the method of equivalent mass in an inhomogeneous atmosphere. The optical characteristics of the dispersed phase of the atmosphere are calculated using the Mie theory. **RESULTS.** An electronic database has been created on the optical characteristics of the gaseous components of the atmosphere, the optical characteristics of atmospheric aerosol and clouds. The effect of anthropogenic impact on the flux of solar radiation falling on the underlying surface is taken into account. The developed modeling takes into account the effect of humidity on the optical characteristics of atmospheric aerosol and its multicomponent composition, depending on the location of the power plant. **CONCLUSION.** The information necessary for numerical modeling of meteorological effects on the functioning of solar thermal and power plants is generalized. When calculating solar radiation fluxes, direct illumination of the light-receiving surface by solar radiation, scattered radiation by atmospheric aerosol and clouds are taken into account.

Keywords: numerical modeling, solar thermal power plants, solar power plants, solar radiation, modeling of optical characteristics, spectral transmission function, optical characteristics of atmospheric aerosol and clouds.

For citation: Moskalenko NI, Akhmetshin AR, Safiullina YaS, Dodov IR, Khamidullina MS. Simulation of the impact of the atmospheric weather state on the efficiency of functioning of solar thermal and power plants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(5):86-99. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-86-99.

Введение

Для выработки тепловой и электрической энергии широко используются котельные установки, работающие на ископаемых газовых и твердых топливах. Стоимость производства энергии с их использованием является в настоящее время наиболее дешевой. Учитывая то обстоятельство, что запасы ископаемых топлив ограничены, а выбросы в атмосферу уходящих продуктов сгорания токсичны для живых организмов и обладают канцерогенными воздействиями, а также воздействуют на антропогенные изменения климата в последние десятилетия разработаны технологии использования альтернативной энергии с применением ветровых установок, солнечных, тепловых и электрических станций, гидроэлектростанций [1-4].

Солнце является неисчерпаемым источником энергии, но приходящая на подстилающую поверхность энергия солнечного излучения (СИ) обладает большой временной изменчивостью (суточной и сезонной) и зависит от места локализации станций и метеосостояния атмосферы [5, 6]. В свете выше изложенного для оптимизации конструкции солнечных тепловых станций (СТС) и солнечных электрических станций (СЭС) требуется знание зависимостей световой энергии солнечного излучения [7, 8], поступающего на световоспринимающую поверхность котельной установки, в зависимости от метеосостояния атмосферы по месту дислокации станции и времени работы станции [9-11]. В настоящей работе рассмотрено получение необходимых для разработки конструкций СТС и СЭС исходных данных методом численного моделирования приходящих потоков СИ в спектральной области их функционирования.

Литературный обзор

Исследования метеосостояния атмосферы [12-15] на временные тренды относятся к среднеглобальной модели атмосферы, в то время как структурные характеристики атмосферы и подстилающей поверхности изменяются в зависимости от региона и времени года. Широкий комплекс исследований [4-8, 16-19] показал, что антропогенные изменения климата в большей степени обусловлены малыми оптически активными газовыми компонентами и атмосферными аэрозолями, парниковый эффект которых усиливается через воздействие на оптические свойства облаков и рост влагосодержания в атмосфере. В настоящее время актуально выполнение зонального моделирования парникового эффекта антропогенных выбросов с использованием статистических данных по структурным характеристикам атмосферы по многолетним результатам аэрологического и космического зондирования атмосферы.

Притоки СИ на световоспринимаемую поверхность СТС и СЭС определяются с

учетом молекулярного поглощения и рассеяния СИ атмосферой рассеяния излучения аэрозолем и перекрытия небосвода многоярусным облачным покровом с учетом отраженного от подстилающей поверхности нисходящего потока СИ [20-21]. Требуется моделирование оптических характеристик (ОХ) газовых компонентов атмосферы, атмосферного аэрозоля и облаков, которые рассмотрены ниже.

Материалы и методы

Моделирование молекулярного поглощения СИ атмосферой. Основной характеристикой поглощения СИ атмосферой является ФСП. ФСП для i компонента устанавливается из соотношения [4, 9]:

$$\left(\frac{1}{\ln \tau'_{\Delta \nu i}}\right)^2 = \left(\frac{1}{\ln \tau'_{\Delta \nu i}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\ln \tau''_{\Delta \nu i}}\right)^2 + \frac{M}{\ln \tau'_{\Delta \nu i} \ln \tau''_{\Delta \nu i}}, \quad (1)$$

$$\text{где } \left| \ln \tau'_{\Delta \nu i} \right| = \int_L k_{\Delta \nu i} F_1 \left[L(T) \right] P_i(L) dL,$$

$$\left| \ln \tau''_{\Delta \nu i} \right| = \left[\int \beta_i P_i(L) P_p^{n_i/m_i}(L) F_2^{1/m_i}(T) dL \right]^m, \quad (2)$$

где n_i , m_i , $k_{\Delta \nu i}$, β_i , M_i – эмпирические параметры ФСП по спектру волнового числа ν , L – оптический путь, P_i – давление компонента i .

$$\tau_{\Delta \nu} = \exp \left[-\sum_i \ln \tau_{\Delta \nu i} \right]. \quad (3)$$

$F_1(T)$, $F_2(T)$ – температурные зависимости $k_{\Delta \nu i}/k_{\Delta \nu 0}$, $B_{\Delta \nu i}/B_{\Delta \nu 0}$.

В соотношении (2) P_p – эффективное давление:

$$P_p = P_{N_2} + \sum_k B_{ik} P_k, \quad (4)$$

где B_{ik} – фактор уширения спектральных линий для столкновений молекул i с молекулой k . Для кислорода $B(O_2) = 0,8$, $B(CO_2) = 1,4 \div 1,6$. Для водяного пара $B(H_2O) \in [6, 30]$ и значительно зависит от температуры.

Для полос с индуцированным давлением поглощения и континуального поглощения излучения крыльями СЛП $m=n=1$, $M=-1$, $k'_{\Delta \nu}(T)=B_{\Delta \nu}$. Для произвольной ФСП $m \in \{0,1\}$, $n \in \{0,1\}$, $M \in \{0,-1\}$.

Неоднородная многокомпонентная среда:

$$\left| \ln \tau'_{i\Delta \nu} \right| = \int_L k_{i\Delta \nu}(T) \rho_i [L(T)] dL, \quad (5)$$

$$\left| \ln \tau''_{i\Delta \nu} \right| = \left\{ \int_L \beta_i^{1/m_i}(T) \rho_i [L(T)] P_{ip}^{n_i/m_i}(L) dL \right\}^{m_i}, \quad (6)$$

$$\left| \ln \tau_{\Delta \nu} \right| = \sum_i \left| \ln \tau_{i\Delta \nu} \right|, \quad (7)$$

$$\tau_{\Delta \nu} = \exp \left[-\sum_i \ln \tau_{i\Delta \nu} [L(T)] \right]. \quad (8)$$

Учет воздействия на ФСП уширения СЛП при столкновениях с молекулами других компонентов реализуются введением эффективного давления:

$$P_{ip} = P_{N_2} + \sum_k B_{ik} [L(T)] P_k(L), \quad (9)$$

где $B_{ik} = \alpha_{0i}(i-k)/\alpha_{0i}(i-N_2)$, $\alpha_{0i}(i-k)$, $\alpha_{0i}(i-N_2)$ – приведенные к давлению $P=1$ атм полуширины линий для столкновения молекул $(i-k)$ и $(i-N_2)$.

Моделирование ОХ атмосферного аэрозоля. Для моделирования потоков СИ в замутненной атмосфере необходимо знание спектральных коэффициентов ослабления СИ атмосферным аэрозолем $\sigma_{\lambda a}(z)$ рассеяния СИ $\sigma_{\lambda a}^s(z)$, поглощения СИ $\sigma_{\lambda a}^a(z)$, индикатрисы рассеяния $f_{\lambda a}(z)$, где Z – высота над уровнем моря, λ – длина волны.

Аэрозоль имеет многокомпонентный состав. Его ОХ зависят от относительной

влажности атмосферы. По химическому составу различают солевую фракцию атмосферного аэрозоля, пылевой аэрозоль, морской аэрозоль, сажевый золь лесных пожаров.

Конденсационный рост частиц является важным фактором, определяющим его влияние на ОХ атмосферы. На рисунке 1 иллюстрируются спектральные зависимости коэффициента ослабления, излучения, солевой фракции атмосферного аэрозоля [13, 18].

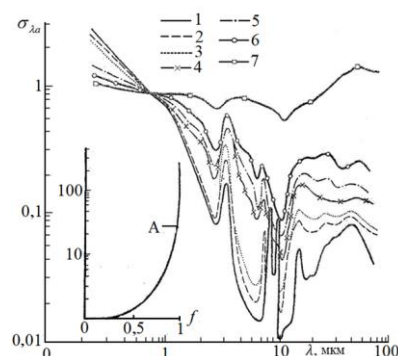


Рис. 1. Спектры коэффициентов нормированного ослабления солевой фракции, атмосферного аэрозоля для вариации относительных влажностей f , %: 1-40; 2-80; 3-95; 4-99; 5-99,5; 6-99,8; 7-100. А это зависимость относительной влажности f на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм от оптической плотности.

Fig. 1. Spectra of coefficients of normalized attenuation of salt fraction, atmospheric aerosol for variation of relative humidity f , %: 1-40; 2-80; 3-95; 4-99; 5-99,5; 6-99,8; 7-100. And this is the dependence of the relative humidity f at a wavelength of $\lambda = 0.55$ microns on the optical density..

Морской аэрозоль представлен частицами морской соли и высота его турбулентного переноса над акваторией моря значительно ниже, чем над сушей [9, 18], при его переносе над континентами следует ожидать подъема частиц морской соли из-за увеличения высоты зоны турбулентного теплообмена, примеры моделирования вертикальных профилей оптической плотности многокомпонентного атмосферного аэрозоля рассмотрены в [4, 13, 18].

В [4] представлены спектральные зависимости $\sigma_{\lambda a}$, $\sigma_{\lambda a}^a$, $\sigma_{\lambda a}^s$ для сажевого аэрозоля (фракция 4) электронной базы данных при различных относительных влажностях. Электронная база данных включает матрицы светорассеивания различных фракций атмосферного аэрозоля для диапазона изменения относительной влажности $f \in (0,1)$, что позволяет учитывать ее воздействие на интенсивности рассеянного СИ, падающего на подстилающую поверхность. Диффузное отраженное СИ от подстилающей поверхности вычисляется по ландшафтной карте [4] с учетом сезонных изменений спектрального альбедо подстилающей поверхности.

На рисунке 2 представлены индикатрисы рассеяния $f(\theta)$ городской дымкой для длин волн 0,3; 0,63; 1,06; 1,7 мкм над Манчестером (кривая 1); Ренне (кривая 2) и субаридной зоной Уайт-Сэнде (кривые 3, 4), соответствующие значению действительной части, комплекс показателя преломления $n=1,5$ и $1,65$.

В таблице 1 представлены нормированные на оптическую плотность коэффициенты ослабления, излучения, рассеяния и поглощения частиц морской соли (А) и континентальной пыли (Б). Микроструктуры морской соли описаны γ -распределением I с параметрами $a = 1$; $b = 7,5$; $c = 0,5$. Пылевой аэрозоль II имеет микроструктуры с параметрами γ -распределения $a = 1$; $b = 9$; $c = 0,5$.

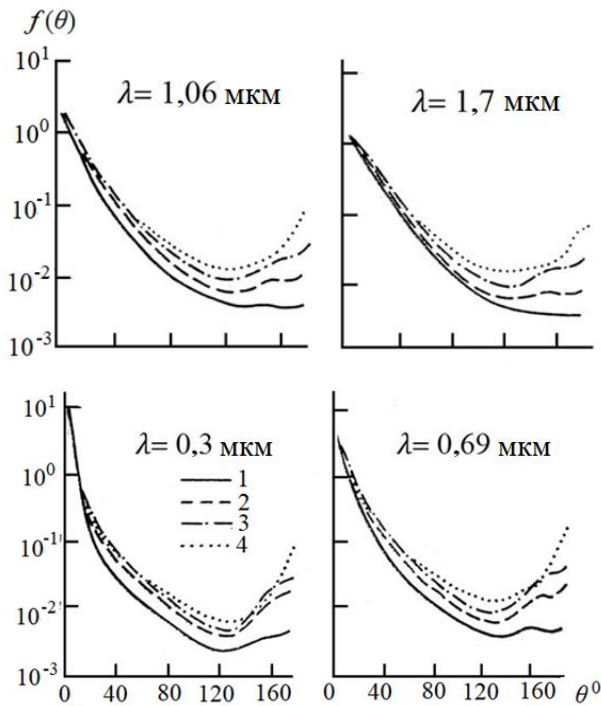


Рис. 2. Индикатрисы рассеяния излучения городской дымкой.

Fig. 2. Radiation scattering indicatrices by urban haze.

В таблице 1 представлены нормированные на оптическую плотность коэффициенты ослабления, излучения, рассеяния и поглощения частиц морской соли (А) и континентальной пыли (Б). Микроструктуры морской соли описаны γ – распределением I с параметрами $a = 1$; $b = 7,5$; $c = 0,5$. Пылевой аэрозоль II имеет микроструктуры с параметрами γ –распределения $a = 1$; $b = 9$; $c = 0,5$.

Таблица 1

Нормированные на оптическую плотность коэффициенты ослабления σ_a , рассеяния σ_a^s и поглощения σ_a^d частиц морской соли (А) и континентальной пыли (Б)

I				II			
А				Б			
мкм	σ_a	σ_a^s	σ_a^d	мкм	σ_a	σ_a^s	σ_a^d
0,55	1,000	0,946	0,054	0,55	1,000	0,855	0,145
1,00	1,149	1,074	0,075	1,00	0,729	0,481	0,248
2,00	1,024	0,803	0,221	2,00	0,324	0,248	0,076
3,00	1,147	0,667	0,480	6,00	0,064	0,020	0,044
3,50	0,708	0,687	0,021	6,50	0,058	0,013	0,045
4,00	0,623	0,577	0,046	7,20	0,143	0,086	0,057
4,50	0,465	0,401	0,064	8,20	0,074	0,008	0,066
6,00	0,351	0,286	0,073	8,50	0,112	0,032	0,080
6,50	0,284	0,173	0,111	8,70	0,137	0,051	0,086
7,20	0,123	0,039	0,084	9,00	0,227	0,120	0,107
8,50	0,721	0,397	0,324	11,00	0,133	0,064	0,069
9,00	0,636	0,296	0,340	13,00	0,075	0,020	0,055

Примечание: I) $a = 1$, $b = 7,5$, $c = 0,5$; II) $a = 1$, $b = 9$, $c = 0,5$.

В работах [4, 9, 13] разработано замкнутое моделирование оптических характеристик атмосферного аэрозоля. Микроструктура $N(r)$ задаётся формулой:

$$N(r) \sum_{i=1}^N N_i(r) = \sum_{i=1}^N A_i r^{a_i} \exp(-b_i r^{c_i}), \quad (10)$$

где N это число фракций; A_i , a_i , b_i , и c_i это параметры i -ой фракции.

В связи с тем, что наиболее достоверная информация по вертикальной структуре аэрозоля получена по оптической плотности, спектральные ослабления, рассеивания и поглощения нормированы на оптическую плотность. Спектральные коэффициенты

ослабления формулами [4, 18]:

$$\sigma_{\lambda a} = \sum_{i=1}^N B_i(z) \sigma_{i\lambda a}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\lambda a}^s = \sum_{i=1}^N B_i(z) \sigma_{i\lambda a}^s, \quad (12)$$

$$\sigma_{\lambda a}^a = \sum_{i=1}^N B_i(z) \sigma_{i\lambda a}^a, \quad (13)$$

$$f(z, \theta) = \sum_{i=1}^N B_i(z) f_i / \sum_{i=1}^N B_i(z), \quad (14)$$

где $B_i(z) = d\tau/dz$ – вертикальный пропил оптической плотности, $\sigma_{i\lambda a}$, $\sigma_{i\lambda a}^a$, $\sigma_{i\lambda a}^s$, f_i – коэффициенты ослабления, рассеяния, поглощения, индикатриса рассеяния для i -ой фракции атмосферного аэрозоля.

В таблице 2 представлены модели микроструктуры для облаков различных форм, рекомендуемых для расчетов оптических характеристик облачности. Выделены формы облаков, которые описываются распределениями с параметрами a , b , c , модальным радиусом R_m , N , см^{-3} – число частиц, в кубическом сантиметре; W , г/м^3 – влагосодержание облаков. Влажность облаков W определяется как масса воды на единицы объема атмосферного воздуха [9]:

$$W = \frac{3\pi}{4} \rho_w \int_r r^3 n(r) dr, \quad (15)$$

где ρ_w – плотность воды. Параметр A определяется соотношением.

$$A = Ncb^{(a+1)c} / r \left(\frac{a+1}{c} \right) \quad (16)$$

Таблица 2

Распределение облачных капель по размерам.

Форма облаков	a	b	c	r_m , мкм	N , см^{-3}	A	W , г/м^3
Слоисто-кучевые (Sc)	5	0,577	1,18	5,34	10^2	$2,83 \cdot 10^{-1}$	0,142
Высоко-кучевые (Ac)	2	0,0028	2,47	10,18	10^2	$1,96 \cdot 10^{-1}$	0,797
Слоистые (St)	5	0,936	1,05	4,70	10^2	$9,79 \cdot 10^{-1}$	0,114
Высоко-слоистые (As)	3	0,192	1,31	6,76	10^2	$3,8 \cdot 10^{-1}$	0,38
Слоисто-дождевые (Ns)	5	0,4	1,25	6,4	10^2	$8,1 \cdot 10^{-1}$	0,236
Кучево-дождевые (Cb)	1	0,0018	2,42	9,68	10^2	1,098	1,035
Мощно-кучевые (Cu Cong)	4	0,667	1,00	6,00	10^2	0,548	0,297
С.6	2	0,100	1,00	20,00	10^1	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,025

Разработанная авторами электронная база данных матриц светорассеяния для моделей облаков, представленных в таблице 2, в области длин волн 0,3-60 мкм. В таблице 3(см. приложение) представлен пример матрицы светорассеяния для N_s облака для длины волны $\lambda=0,3$ мкм.

На рисунке 3 представлены вероятности перекрытия небосвода облачностью различных ярусов для июня месяца.

В интересах автоматизированного моделирования подготовлена библиотека ОХ облачности для восьми модификаций микроструктуры из таблицы 3 для дискретных значений длин волн в области спектра 0,3-60 мкм. При этом использованы данные по спектру показателя преломления [13].

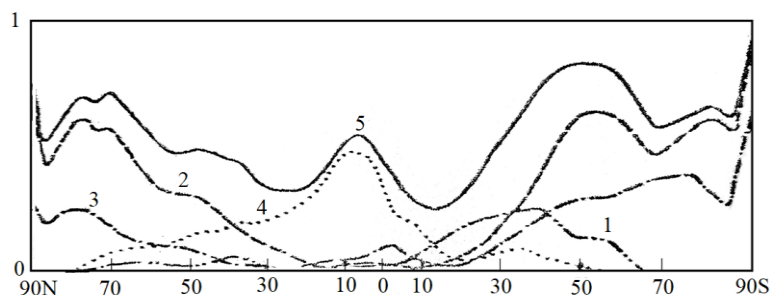


Рис. 3. Вероятность перекрытия небосвода облачностью различных ярусов и типов: N – северная широта; S – южная широта; 1- облачность CL₃; 2 – облачность CL₂; 3 – облачность CL₄; 4 – облачность CL₁; 5 – вероятность перекрытия небосвода всеми типами облаков.

Fig. 3. The probability of overlapping the sky with clouds of various tiers and types: N – northern latitude; S – southern latitude; 1- cloud cover CL₃; 2 – cloud cover CL₂; 3 – cloud cover CL₄; 4 – cloud cover CL₁; 5 – the probability of overlapping the sky with all types of clouds.

В интересах автоматизированного моделирования подготовлена библиотека ОХ облачности для восьми модификаций микроструктуры из таблицы 3 для дискретных значений длин волн в области спектра 0,3-60 мкм. При этом использованы данные по спектру показателя преломления [13].

Результаты

Расчеты эффективности работы тепловых и электрических станций. Для безоблачной атмосферы потоки нисходящего излучения определяются из потока СИ на внешней границе атмосферы, ослабленной атмосферой газовыми компонентами и аэрозолем. На рисунке 4 продемонстрированы функции спектрального пропускания атмосферы в зависимости от зенитного угла для модели среднеглобальной атмосферы [4]. Подсветка рассеянным нисходящим СИ вычисляется в многопоточном приближении [9].

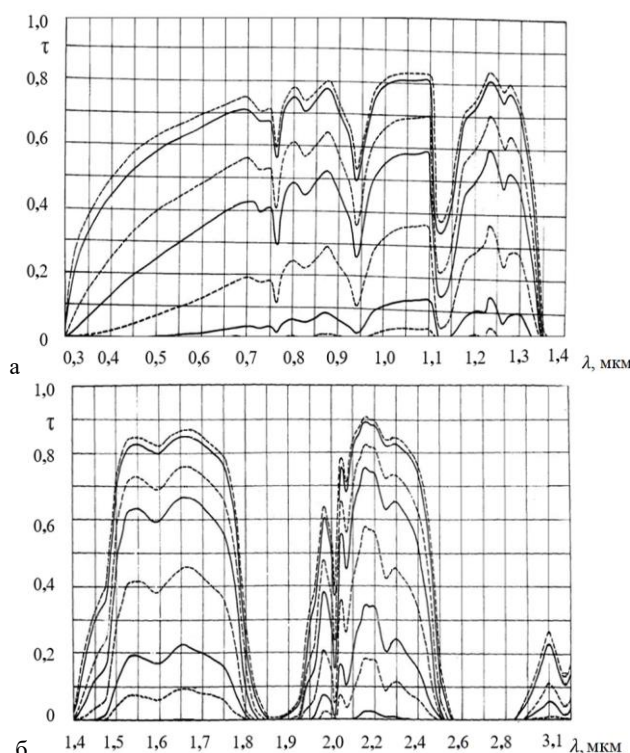


Рис. 4. Спектральная прозрачность атмосферы в спектральном диапазоне 0,3-3,1 мкм при зенитных углах обзора θ (z_1): 10-0°, 11-30°, 12-60°, 13-70°, 14-80°, 15-85°, 16-87°, 17-89°, 18-90°, 19-90°20', для спектральной области: а – 0,3-1,04 мкм; б – 1,4-3,1 мкм.

Fig. 4. Spectral transparency of the atmosphere in the spectral range of 0.3-3.1 microns at zenith viewing angles θ (z_1): 10-0°, 11-30°, 12-60°, 13-70°, 14-80°, 15-85°, 16-87°, 17-89°, 18-90°, 19-90°20', for the spectral region: a – 0.3-1.04 microns; b – 1.4-3.1 microns.

Вычисление потоков коротковолновой радиации $F_s^\uparrow(z)$, $F_s^\downarrow(z)$ производится в многопотоковом приближении [13]. Согласно [4, 9, 13, 18], можно получить потоки по взаимно перпендикулярным направлениям рассеянные системой из двух слоев с учетом перераспределения излучения между слоями:

$$\begin{bmatrix} I_1^\downarrow, I_2^\downarrow \end{bmatrix} = [x, y] \begin{bmatrix} i_1 & m_1 \\ m_3 & i_3 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} I_1^\uparrow, I_2^\uparrow \end{bmatrix} = [B_1, C_1] + [x, y] \begin{bmatrix} j_1 & k_1 \\ k_3 & j_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & D_2 \\ D_4 & A_4 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$[x, y] = \frac{1}{(1-a)(1-d)-bc} [A_1, D_1] \begin{bmatrix} 1-a & b \\ c & 1-d \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 & B_2 \\ C_4 & B_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_3 & j_1 \\ j_3 & k_1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где $\begin{bmatrix} I_1^\downarrow, I_2^\downarrow \end{bmatrix}$ – нисходящие и $\begin{bmatrix} I_1^\uparrow, I_2^\uparrow \end{bmatrix}$ – восходящие потоки излучения в первом и во втором слоях среды для углов θ_0 , $\theta_0 = \pi/2 - \theta_0$ при зенитном угле Солнца θ_0 , B_1, C_1 – отраженные и A_1, D_1 – пропущенные потоки излучения, определяемые углами θ_0 и θ_0 , рассеянные верхним слоем при падении излучения сверху; B_2, C_2, A_2, D_2 , – аналогично, потоки рассеянного излучения для падения излучения снизу, но при зенитном угле θ_0 : $i_1, j_1, k_1, m_1 : i_2, j_2, k_2, m_2 : i_3, j_3, k_3, m_3 : i_4, j_4, k_4, m_4$; отвечают потокам излучения для второго слоя. Используя соотношения (17-19), построена и реализована точная вычислительная схема отраженного и пропущенного потоков для многослойной неоднородной по высоте атмосферы. При наличии подстилающей поверхности с альбедо q , альбедо системы «подстилающая поверхность – атмосфера» в зависимости от зенитного угла солнца θ_0 определяется соотношением:

$$q^*(\theta_0) [I_1^\uparrow(\theta_0) + I_2^\uparrow(\theta_0)] + [I_1^\downarrow(\theta_0) + I_2^\downarrow(\theta_0)] \frac{Tq}{1-Rq}, \quad (20)$$

где $I_1^\uparrow(\theta_0), I_2^\uparrow(\theta_0)$ – потоки излучения на верхней границе атмосферы; $I_1^\downarrow(\theta_0), I_2^\downarrow(\theta_0)$ – потоки излучения на уровне подстилающей поверхности; T – передаточная функция атмосферы для диффузного излучения подстилающей поверхности; R – альбедо атмосферы при наблюдении снизу. Для определения интегрального по спектру альбедо монохроматические потоки:

$$J^\uparrow(\theta_0) = J_1^\uparrow(\theta_0) + J_2^\uparrow(\theta_0) + (J_1^\downarrow(\theta_0) + J_2^\downarrow(\theta_0))qR, \quad (21)$$

интегрируются по оперативной схеме расчетов с учетом спектрального веса излучения Солнца в интегральном потоке.

На рисунке 5 представлена зависимость альбедо δ системы «подстилающая поверхность – атмосферный аэрозольный слой». Для модели среднеглобального атмосферного аэрозоля 1 получено значение вероятности выживания кванта $\tilde{\omega}=0,9$, а тропосферного аэрозоля 2 над Западной Европой $\tilde{\omega}=0,75$. Для модели промышленного сажевого аэрозоля $\tilde{\omega}=0,6$ [4]. Кривые (рис. 5) демонстрируют оценку влияния атмосферного аэрозоля на альбедо системы в зависимости от величины альбедо подстилающей поверхности, от оптических свойств аэрозоля и от оптической толщины аэрозольного облака [4, 18]. Атмосферный аэрозоль любого типа уменьшает альбедо системы «облачность-аэрозольное облако», «заснеженная поверхность – аэрозольное облако».

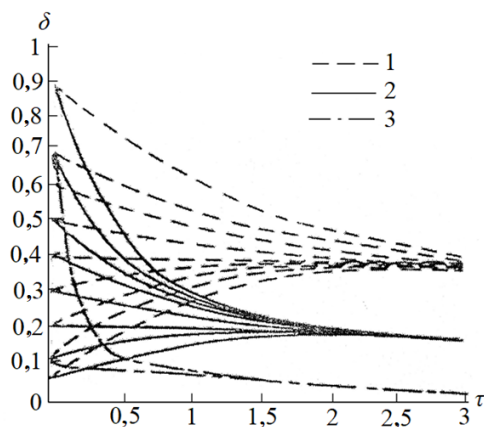


Рис. 5. Зависимость альbedo δ системы подстилающая поверхность- атмосферный аэрозольный слой от оптической толщины τ аэрозольного облака для моделей среднеглобального атмосферного аэрозоля (1), промышленного аэрозоля (2) и сильного поглощающего аэрозоля (3) при различных значениях альbedo подстилающей поверхности.

Fig. 5. Dependence of the albedo δ of the underlying surface- atmospheric aerosol layer system on the optical thickness τ of the aerosol cloud for models of medium-global atmospheric aerosol (1), industrial aerosol (2) and strong absorbing aerosol (3) at different values of the albedo of the underlying surface.

Максимальное тепловосприятие СИ достигается в установках с автоматизированным ориентированием зеркальной системы на диск Солнца.

Разработанный в настоящей работе метод численного моделирования позволяет оценить степень влияния метеосостояния атмосферы (ясный, замутненный, облачный, антропогенно-возмущенный) и рассчитать эффективность функционирования СТС и СЭС в зависимости от места их расположения и конструкторских решений. Перспективны расположения СТС и СЭС в местах с высокой среднегодовой освещенностью подстилающей поверхности (например, Крым, Оренбургская, Астраханская, Воронежская области).

Далее рассмотрим применение метода численного моделирования для СЭУ. На рисунке 6 представлено спектральное альbedo атмосферы для СИ при наблюдении атмосферы снизу для невозмущенной атмосферы и атмосферы с городской дымкой. На рисунке 7 иллюстрируется эффективность функционирования в условиях антропогенно невозмущенной атмосферы и атмосферы с учетом городской дымки. На рисунке 8 показаны отношения эффективности функционирования невозмущенной безоблачной атмосферы и атмосферы с учетом городской дымки для кремниевых и с тонкой пленкой халькогенидов.

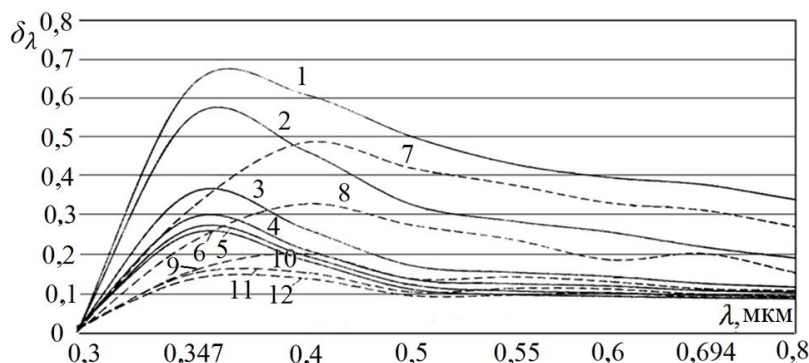


Рис. 6. Спектральное альbedo атмосферы для солнечного излучения при просмотре снизу для невозмущенной атмосферы (при зенитных углах зрения 0: 1-85; 2-75; 3-45; 4-15; 5-5; 6-0) и для атмосферы с городским аэрозолем (при зенитных углах зрения 0: 7-85; 8-75; 9-45; 10-15; 11-5; 12-0) в диапазоне спектра 0,3-0,8 мкм

Fig. 6. Spectral albedo of the atmosphere for solar radiation when viewed from below for an undisturbed atmosphere (at zenith angles of view 0: 1-85; 2-75; 3-45; 4-15; 5-5; 6-0) and for an atmosphere with urban aerosol (at zenith angles of view 0: 7-85; 8-75; 9-45; 10-15; 11-5; 12-0) in the spectrum range of 0.3-0.8 microns

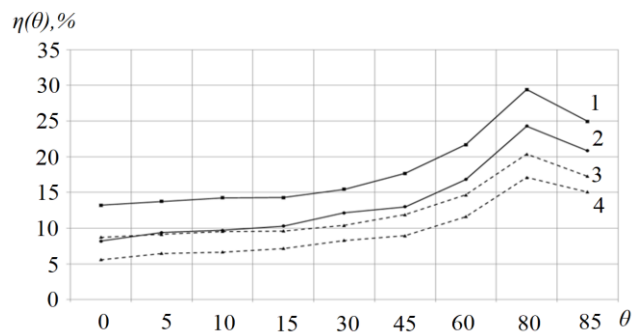


Рис. 7. Эффективность работы в антропогенно безоблачной атмосфере и атмосфере с учетом городской дымки для кремниевых фотоэлектрических модулей (1, 2) и фотоэлектрических модулей с тонкой пленкой халькогенидов (3, 4).

Fig. 7. Efficiency of operation in an anthropogenically cloudless atmosphere and an atmosphere taking into account urban haze for silicon photovoltaic modules (1, 2) and photovoltaic modules with a thin film of chalcogenides (3, 4).

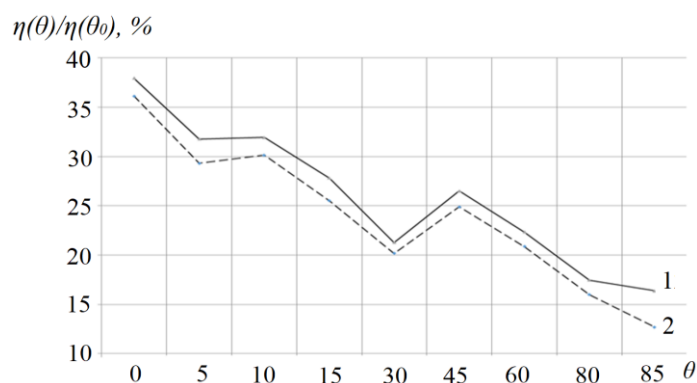


Рис. 8. Коэффициенты эффективности функционирования в антропогенно ненарушенной атмосфере и атмосфере с учетом городской дымки для кремниевых фотоэлектрических модулей (1) и фотоэлектрических модулей с тонкой пленкой халькогенидов (2).

Fig. 8. Efficiency coefficients of functioning in an anthropogenically disturbed atmosphere and atmosphere taking into account urban haze for silicon photovoltaic modules (1) and photovoltaic modules with a thin film of chalcogenides (2).

Обсуждение

Рассмотрена проблема численного моделирования воздействий метеосостояния атмосферы на функционирования СТС и СЭС. Анализируемое влияние влажности на оптические характеристики атмосферного и антропогенного аэрозолей. Учитывается многокомпонентный состав атмосферного аэрозоля, каждая фракция атмосферного аэрозоля задается в виде вертикального профиля и его оптической плотности на длине волны $\lambda=0,55$ мкм в соответствии с влажностью атмосферы r . Спектральные зависимости коэффициентов ослабления, поглощения и рассеивания и индикатрисы рассеивания определяются по электронной базе данных, по ОХ, нормированных на оптическую плотность, ОХ, заданной для дискретных длин в диапазоне спектра 0,2-50 мкм в диапазоне относительной влажности $r \in (0,100\%)$. Облачность атмосферы принимается многоярусной и задается в виде вероятности, перекрытия небосвода облачностью нижнего, среднего и верхнего яруса. Для моделирования ОХ облаков представлена электронная база данных матриц светорассеивания для облаков различных форм заданных гамма-распределениями их микроструктуры. ОХ смешанных форм формируется программой для ПВЭМ. Молекулярные поглощения СИ вычисляются двухпараметрическим методом эквивалентной массы.

Приходящее СИ воспринимается световоспринимающими поверхностями СТС и СЭС и передается системой зеркал на тепловую принимающую поверхность котельной установки для выработки пара с последующим преобразованием тепловой энергии пара в электрическую в паровой турбине. Поток СИ вычисляются методом сложения слоев в многопоточном приближении [9] с учетом молекулярного поглощения излучения, рассеяния излучения атмосферным аэрозолем и многоярусной облачностью.

Выводы

По результатам выполненного моделирования выявлена эффективность работы СТС и СЭС для различных метеосоставов атмосферы и широтного пояса Земли (географического места дислокации СТС и СЭС).

Разработанный полуаналитический метод и программный комплекс расчетов коротковолновой радиации (КВР) использован для расчетов спектрального и интегрального альбедо системы Земля - атмосфера для реальных моделей замутненной атмосферы с одновременным учетом молекулярного рассеяния, молекулярного поглощения и при наличии многоярусных облаков и с учетом спектрального альбедо подстилающей поверхности.

По сравнению с методом многократного рассеяния СИ метод сложения слоев многопоточного приближения позволяет многократно уменьшить затраты машинного времени на выполнение расчетов приходящих к подстилающей поверхности потоков СИ и потока СИ к световоспринимающим поверхностям СТС и СЭС.

Литература

1. Owusu P.A., Asumadu-Sarkodie S. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation // *Cogent Engineering*. 2016. V. 3, Iss. 1. art. no. 1167990.
2. Creutzig F., Agoston P., Goldschmidt J.C., et al. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change // *Nature Energy*. 2017. V. 2. art. no. 17140.
3. Eissa Y., Naseema Beegum S., Gherboudj I., et al. Prediction of the day-ahead clear-sky downwelling surface solar irradiances using the REST2 model and WRF-CHIMERE simulations over the Arabian Peninsula // *Solar Energy*. 2018. V. 162. pp. 36-44.
4. Москаленко Н.И., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С. Влияние антропогенных воздействий на работу солнечных электрических и тепловых станций // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2016. № 3-4. С. 29-39.
5. Фейгельсон Е.М., Краснокутская Л.Д. Потоки солнечного излучения и облака. Ленинград. Гидрометеиздат. 1978. 157 с.
6. Casado-Rubio J.L., Revuelta M.A., Postigo M., et al. A postprocessing methodology for direct normal irradiance forecasting using cloud information and aerosol load forecasts // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2017. V.56. Iss. 6. pp. 1595-1602.
7. Thomas J.A. Optimisation Method for the clear sky PV forecast using power records from arbitrarily oriented panels // *7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications*. 2018. pp. 117-123. art. no. 8566993.
8. Melzi F.N., Touati T., Same A., et al. Hourly solar irradiance forecasting based on machine learning models // *15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications*. 2016. pp. 441-446. art. no. 7838182.
9. Москаленко Н.И., Родионов Л.В., Хамидуллина М.С. и др. Численное моделирование радиационного теплообмена // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2015. № 1-2. С. 33-43.
10. Кондратьев К.Я., Донченко В.К. Экодинамика и геополитика. Т.1. Глобальные проблемы. СПб. 1992. 1032 с.
11. Tampieri F., Fomasi C. Size distribution models of fog and cloud droplets in terms of the modified gamma function // *Tellus*. 1976. V. 28. pp. 1584-1593.
12. Voyant C., Notton G. Solar irradiation now casting by stochastic persistence: A new parsimonious, simple and efficient forecasting tool // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. V. 92. pp. 343-352.
13. Москаленко Н.И., Паржин С.Н., Хамидуллина М.С. Спектрометрия газовых сред с применением двухлучевой установки на базе спектрофотометра ИКС-24 // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2016. № 5-6. С. 99-109.
14. Deirmendjian D. Far-infrared and sub-millimeter wave attenuation by clouds and rain // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1975. V. 14. pp. 1584-1593.
15. Hale G.M., Querry M.R. Optical constraints of water in the 200 nm to 200 mm wavelength region // *Applied Optics*. 1973. V. 12. № 3. pp. 555-563.
16. Fan J., Wang Y., Rosenfeld D., et al. Review of aerosol-cloud interactions. Mechanisms, significance and challenges // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2016. V. 73. Iss. 11. pp. 4221-4252.
17. Kosmopoulos P.G., Kazadzis S., Taylor M., et al. Dust impact on surface solar irradiance assessed with model simulations, satellite observations and ground-based measurements // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10. Iss. 7. pp. 2435-2453.
18. Москаленко Н.И., Додов И.Р., Каюмова Г.В., и др. Моделирование радиационных характеристик газовой фазы продуктов сгорания на базе высокотемпературных атласов

параметров спектральных линий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. №11-12. С. 65-80.

19. Fountoulakis I., Kosmopoulos P., Papachristopoulou K., et al. Effects of aerosols and clouds on the levels of surface solar radiation and solar energy in Cyprus // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 12. art. no. 2319.

20. Perez R., Lorenz E., Pelland S., et al. Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe // Solar Energy. 2013. V. 94. pp. 305-326.

21. Shahsavari A., Akbari M. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V. 90. pp. 275-291.

Авторы публикации

Москаленко Николай Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж».

Сафиуллина Яна Салаватовна – канд. техн. наук, заместитель директора МБУ «СШОР «Грация» г.Казани.

Додов Ибрагим Русланович – аспирант кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Хамидуллина Марьяна Салаватовна – аспирант кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Owusu PA, Asumadu-Sarkodie S. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*. 2016; 3(1): 1167990. doi: 10.1080/23311916.2016.1167990.
2. Creutzig F, Agoston P, Goldschmidt JC, et al. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. *Nature Energy*. 2017;2: 17140. doi: 10.1038/nenergy.2017.140.
3. Eissa Y, Naseema Beegum S, Gherboudj I, et al. Prediction of the day-ahead clear-sky downwelling surface solar irradiances using the REST2 model and WRF-CHIMERE simulations over the Arabian Peninsula. *Solar Energy*. 2018;162:36-44. doi: 10.1016/j.solener.2018.01.003.
4. Moskalenko NI, Khamidullina MS, Safiullina YaS. Influence of anthropogenic influences on the operation of solar electric and thermal power plants. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2016;3-4:29-39. doi: 10.30724/1998-9903-2016-0-3-4-29-39.
5. Feigelson EM, Krasnokutskaya LD. *Streams of solar radiation and clouds*. Leningrad. Hydrometeoizdat. 1978;157.
6. Casado-Rubio JL, Revuelta MA, Postigo M, et al. A postprocessing methodology for direct normal irradiance forecasting using cloud information and aerosol load forecasts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2017;56(6):1595-1602. doi: 10.1175/JAMC-D-16-0297.1.
7. Thomas JA. Optimisation Method for the clear sky PV forecast using power records from arbitrarily oriented panels. *7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications*. 2018;117-123. doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566993.
8. Melzi FN, Touati T, Same A, et al. Hourly solar irradiance forecasting based on machine learning models. *15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications*. 2016;441-446. doi: 10.1109/ICMLA.2016.186
9. Moskalenko NI, Rodionov LV, Khamidullina MS, et al. Numerical modeling of radiation heat transfer. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2015;1-2:33-43. doi: 10.30724/1998-9903-2015-0-1-2-33-43.
10. Kondratyev KYa, Donchenko VK. *Ecodynamics and Geopolitics*. V. 1. Global problems. SPb. 1992;1032.
11. Tampieri F, Fomasi C. Size distribution models of fog and cloud droplets in terms of the modified gamma function. *Tellus*. 1976;28:1584-1593.

12. Voyant C, Notton G. Solar irradiation now casting by stochastic persistence: A new parsimonious, simple and efficient forecasting tool. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;92:343-352. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.116.
13. Moskalenko NI, Parzhin SN, Khamidullina MS. Spectrometry of gaseous media using a two-beam setup based on the IKS-24 spectrophotometer. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2016;5-6:99-109. doi: 10.30724/1998-9903-2016-0-5-6-99-109.
14. Deirmendjian D. Far-infrared and sub-millimeter wave attenuation by clouds and rain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1975;14:1584-1593.
15. Hale GM, Querry MR. Optical constraints of water in the 200 nm to 200 mm wavelength region. *Applied Optics*. 1973;12(3):555-563.
16. Fan J, Wang Y, Rosenfeld D, et al. Review of aerosol-cloud interactions. Mechanisms, significance and challenges. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2016;73(11):4221-4252. doi: 10.1175/JAS-D-16-0037.1
17. Kosmopoulos PG, Kazadzis S, Taylor M, et al. Dust impact on surface solar irradiance assessed with model simulations, satellite observations and ground-based measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017;10(7):2435-2453. doi: 10.5194/amt-10-2435-2017.
18. Moskalenko NI, Dodov IR, Kayumova GV, et al. Modeling of radiation characteristics of the gas phase of combustion products based on high-temperature atlases of spectral line parameters. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2018;11-12:65-80. doi: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-65-80.
19. Fountoulakis I, Kosmopoulos P, Papachristopoulou K, et al. Effects of aerosols and clouds on the levels of surface solar radiation and solar energy in Cyprus. *Remote Sensing*. 2021;13(12):2319. doi: 10.3390/rs13122319.
20. Perez R, Lorenz E, Pelland S, et al. Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe. *Solar Energy*. 2013;94:305-326. doi: 10.1016/j.solener.2013.05.005.
21. Shahsavari A, Akbari M. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;90:275-291. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.065.

Authors of the publication

Nikolay I. Moskalenko – Kazan State Power Engineering University.

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University.

Yana S. Safiullina – MBU «SSHOR» Gratsia.

Ibragim R. Dodov – Kazan State Power Engineering University.

Maryana S. Khamidullina – Kazan State Power Engineering University.

Получено **22.10.2021г.**

Отредактировано **25.10.2021г.**

Принято **27.10.2021г.**

Приложение (таблица 3)

Матрица рассеяния облаков (N_s), $\lambda = 0,3$ мкм, $\sigma_a = 43,235 \text{ km}^{-1}$, $\tilde{\omega} = 0,99999$

Q	M_2		M_1		S_{21}		D_{21}	
0,0	0,1715	04	0,1715	04	0,1715	04	0,0	
0,5	0,5915	03	0,5916	03	0,5915	03	0,2378	01
1,0	0,6241	02	0,6235	02	0,6236	02	-0,7276	00
3,0	0,2667	01	0,2608	01	0,2633	01	-0,1932	-01
4,0	0,1437	01	0,1393	01	0,1412	01	-0,8196	-02
5,0	0,1025	01	0,9936	00	0,1007	01	-0,3444	-02
6,0	0,8176	01	0,7895	00	0,8013	00	-0,2972	-02
7,0	0,7176	00	0,6947	00	0,7041	00	-0,2170	-02
8,0	0,6425	00	0,6235	00	0,6311	00	-0,2542	-02
9,0	0,5925	00	0,5752	00	0,5921	00	-0,8558	-03
10,0	0,5546	00	0,5432	00	0,5472	00	-0,7680	-03
20,0	0,3207	00	0,3302	00	0,3298	00	0,2898	-03
25,0	0,2409	00	0,2527	00	0,2451	00	0,3977	-03
30,0	0,1774	00	0,1904	00	0,1814	00	0,1211	-02
35,0	0,1271	00	0,1410	00	0,1311	00	0,1277	-02
40,0	0,8887	00	0,1031	00	0,9309	-01	0,9668	-03
45,0	0,6146	-01	0,7531	-01	0,6509	-01	0,7655	-03
50,0	0,4216	-01	0,5254	-01	0,4443	-01	0,8022	-03
55,0	0,2848	-01	0,3626	-01	0,2948	-01	0,7830	-03
60,0	0,1890	-01	0,2417	-01	0,1892	-01	0,6088	-03
65,0	0,1219	-01	0,1551	-01	0,1147	-01	0,3966	-03
70,0	0,8011	-01	0,9376	-02	0,6446	-02	0,2904	-03
75,0	0,5457	-02	0,5465	-02	0,3367	-02	0,1730	-03
80,0	0,3980	-02	0,3067	-02	0,1513	-02	0,1016	-03
85,0	0,3079	-02	0,1731	-02	0,4860	-03	0,4739	-04
90,0	0,2579	-02	0,1083	-02	-0,5136	-04	0,4473	-04
95,0	0,2294	-02	0,8320	-03	-0,3000	-03	0,2883	-04
100,0	0,2160	-02	0,8619	-03	-0,3801	-03	0,4729	-04
110,0	0,2368	-02	0,1336	-02	-0,1225	-03	0,2846	-03
115,0	0,2584	-02	0,1680	-02	0,8922	-04	0,6289	-05
120,0	0,6955	-02	0,1817	-02	0,1518	-02	0,7657	-03
124,0	0,6059	-02	0,1525	-02	0,4287	-03	0,1503	-02
126,0	0,4404	-02	0,1325	-02	-0,2313	-03	0,1222	-02
128,0	0,3174	-02	0,1145	-02	-0,6448	-03	0,8619	-03
130,0	0,2383	-02	0,1029	-02	-0,8295	-03	0,6019	-03
134,0	0,2022	-02	0,1110	-02	-0,8952	-03	0,5495	-03
138,0	0,9342	-02	0,2563	-02	0,4246	-03	0,3656	-02
140,0	0,2982	-01	0,4493	-02	0,3501	-02	0,9053	-02
144,0	0,5279	-01	0,5065	-02	0,9478	-02	-0,5489	-02
146,0	0,1811	-01	0,1181	-01	0,4344	-02	-0,4135	-02
148,0	0,1914	-01	0,1119	-01	0,4986	-02	0,2610	-02
150,0	0,1900	-01	0,1050	-01	0,3901	-02	0,1289	-02
154,0	0,1382	-01	0,1124	-01	0,2560	-02	0,5816	-03
156,0	0,1206	-01	0,1134	-01	0,1849	-02	0,7596	-03
158,0	0,1010	-02	0,1107	-01	0,1259	-02	0,8780	-03
160,0	0,9973	-02	0,1097	-01	0,6966	-03	0,7384	-03
166,0	0,7948	-02	0,1046	-01	-0,5535	-03	0,5512	-03
170,0	0,7169	-02	0,1078	-01	-0,9224	-03	0,4250	-03
175,0	0,7414	-02	0,1313	-01	-0,2798	-03	0,4110	-03
176,0	0,8037	-02	0,1495	-01	0,5700	-03	0,4699	-03
177,0	0,9158	-02	0,1774	-01	0,1527	-02	0,2709	-04
178,0	0,1124	-01	0,2467	-01	0,4765	-02	0,8958	-03
179,0	0,3633	-01	0,5023	-01	0,2404	-01	-0,2826	-03
180,0	0,4958	-01	0,4958	-01	-0,4958	-01	0,0	