

ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАБОТУ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ СТАНЦИЙ

Н.И. МОСКАЛЕНКО, М.С. ХАМИДУЛЛИНА, Я.С. САФИУЛЛИНА

Казанский государственный энергетический университет

Рассматривается моделирование сложного радиационного теплообмена в системах антропогенно-возмущенная атмосфера – солнечные электрические и тепловые станции. Обсуждается структурная схема моделирования притоков солнечного излучения на тепловоспринимающую поверхность солнечных тепловых и электрических станций. Расчеты спектральных интенсивностей и потока солнечного излучения выполняются с учетом селективности молекулярного поглощения излучения ингредиентами газовой фазы атмосферы, рассеяния и поглощения излучения атмосферным аэрозолем и облаками с учетом статистики их распределения в зависимости от места расположения станций и времени года.

Ключевые слова: радиационный теплообмен, солнечное излучение, солнечные тепловые станции.

Введение

Несмотря на то, что использование Солнца как источника тепловой и электрической энергий сопряжено с высокой стоимостью устройств для преобразования солнечного излучения (СИ) в тепловую или электрическую энергию, география его теплоэнергетического использования с каждым годом расширяется, так как Солнце является неисчерпаемым экологически чистым источником энергии. При этом коэффициент полезного действия (КПД) различных гелиотехнических устройств составляет 10÷50 % полной световой энергии Солнца, достигающей преобразователя [1]. Следует отметить сильную пространственно-временную изменчивость достигающего подстилающей поверхности потока СИ, обусловленную вариациями положения Солнца на небосводе (суточными и сезонными), локализацией места (широта, долгота), изменчивостью метеосостояния атмосферы, влиянием антропогенных загрязнений атмосферы (особенно в окрестности крупных городов и промышленно развитых регионов). Разработанное в работах [2–6] моделирование спектральных полей коротковолновой радиации в условиях ясной, замутненной, облачной и антропогенно-возмущенной атмосферы позволяет оценить влияние хозяйственной деятельности человека на работу перспективных солнечных тепловых и электрических станций (СТС, СЭС), оценить их рентабельность. Сам растительный покров поверхности Земли можно рассматривать как естественный преобразователь энергии излучения Солнца в органическое топливо.

Разработанные методы расчетов спектральных интенсивностей и потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на подстилающую поверхность [2–6] позволяют рассчитать эффективность функционирования установок солнечного горячего водоснабжения (СГВ) для любого места их расположения и конструкторского решения. Наиболее эффективны установки СГВ с системой автоматизированной ориентации тепловоспринимающей поверхности на диск Солнца [1]. В этом случае тепловосприятие СИ в установке СГВ будет максимально возможным. Ориентация тепловоспринимающей поверхности должна производиться как по зенитному, так и азимутальному углам с учетом временных вариаций положения Солнца на небосводе,

© Н.И. Москаленко, М.С. Хамидуллина, Я.С. Сафиуллина

Проблемы энергетики, 2016, № 3-4

которые точно вычисляются для любой локализации места расположения установки СГВ [7]. В случае горизонтального или наклонного расположения тепловоспринимающей поверхности установки СГВ необходимо введение эффективной площади тепловоспринимающей поверхности. В расчетах необходимо учитывать селективность спектров поглощения СИ атмосферными газами прямой и рассеянной солнечной радиации, рассеянное диффузное отраженное подстилающей поверхностью излучение Солнца в заднюю полусферу, тепловое противоизлучение атмосферы, падающее на тепловоспринимающую поверхность, потери тепла, обусловленные конвективным теплообменом и наружным радиационным охлаждением.

Если тепловоспринимающая поверхность является «черной», а теплообмен в тыльную полусферу отсутствует, то по радиационному балансу между приходящим потоком СИ и собственному тепловому излучению тепловоспринимающей поверхности можно определить максимально возможную температуру теплоносителя T_{max} . Например, при температуре атмосферы $T_a=300$ К, и положении Солнца с зенитным углом $\theta_0=0^\circ$ $T_{max}\approx 420$ К. Действительная температура теплоносителя в солнечном коллекторе всегда будет ниже T_{max} и будет зависеть от зенитного угла Солнца θ_0 , угла наклона плоскости коллектора к горизонту θ_0^* и азимутального угла φ^* , площади коллектора, метеосостояния атмосферы, производительности горячего водоснабжения D , конструкции солнечного коллектора.

Метод расчета эффективности работы преобразователей энергии солнечных тепловых станций

Рассмотрим далее метод расчета эффективности работы преобразователей СТС с учетом статистических характеристик по метеосостоянию атмосферы, которая характеризуется высокой пространственно-временной изменчивостью, одним из факторов которой являются антропогенные возмущения атмосферы и антропогенные воздействия на защитные покрытия преобразователя. Полный поток излучения, достигающий тепловоспринимающей поверхности преобразователя, определяется соотношением

$$F^*(t) = \sum_i f \left[\bar{F}_i(s, \theta_0^*, \varphi^*, t) P_i(\theta_0^*, \varphi^*) + \bar{F}_{iT}^*(t) + \bar{F}_{iT}(t) P_{iT} \right] + \int_{\lambda} \sum_i \bar{F}_{i\lambda}(s, \theta_0^*, \varphi^*, t) \delta_{\lambda}^* \delta_{\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

где $\bar{F}_i$ – среднемесячный или среднесуточный поток СИ, падающего на стекольное (пленочное) покрытие солнечного преобразователя, где f_i – вероятность проявления ситуации i , i – номер ситуации (ясно, одноярусная облачность нижнего, среднего и верхнего ярусов, двухярусное перекрытие нижнего и среднего ярусов, двухярусное перекрытие нижнего и верхнего ярусов, двухярусное перекрытие среднего и верхнего ярусов, трехярусное перекрытие небосвода облаками нижнего, среднего и верхнего ярусов; при этом удовлетворяется условие $\sum_i f_i = 1$); s – площадь

тепловоспринимающей поверхности теплового преобразователя; t – время (дня, месяца); δ_{λ} – спектральное альbedo подстилающей поверхности; δ_{λ}^* – спектральное альbedo атмосферы для диффузного отраженного излучения; $\bar{F}_{iT}^*(t)$ – собственное

тепловое излучение защитного покрытия, которое нагревается вследствие поглощения солнечного излучения; $\bar{F}_{iT}(t)$ – поток теплового противозлучения атмосферы; $P_{iT}(t), P_i^*(t)$ – прозрачность защитного покрытия для теплового излучения и СИ для ситуации i . Величины $P_{iT}(t), P_i^*(t)$ определяются как отражением, так и поглощением излучения защитным покрытием. Величины $P_{iT}(t)$ и $P_i^*(t)$ также могут меняться в связи с антропогенными воздействиями. Поток излучения, воспринятый тепловоспринимающей поверхностью, определяется ее коэффициентом черноты $\bar{\xi}$, так что

$$F_v^*(t) = F^*(t) \bar{\xi}. \quad (2)$$

Путем механической и технологической обработки тепловоспринимающей поверхности возможно достигнуть значений $\bar{\xi} = 0,96 \div 0,98$. Тыльную сторону солнечного коллектора желательно покрывать светоотражающими покрытием для уменьшения тепловых потерь и применять теплоизоляцию для уменьшения наружного охлаждения. Если ввести коэффициент q_{HO} наружного охлаждения, то полезное восприятие $F_n^*(t)$ определится соотношением

$$F_n^*(t) = F^*(t) \bar{\xi} q_{HO}(t). \quad (3)$$

Потоки излучения $\bar{F}_i(s, \theta^*, \varphi^*, t)$ вычисляются путем интегрирования спектральных интенсивностей прямой подсветки поверхности СИ и рассеянным излучением по спектру длин волн и телесному углу в пределах полусферы по соотношениям, рассмотренным в работах [2, 3, 6]. Алгоритмы расчета тепловых потоков излучения $\bar{F}_{iT}$ в системе Земля – атмосфера рассмотрены в работе [4].

Отметим, что в случае перекрытия небосвода облачностью значения $\bar{F}_i(s, \theta^*, \varphi^*, t)$ определяются только рассеянным излучением. Во всех случаях поглощение излучения атмосферой вычисляется с учетом острой селекции спектров поглощения газовой фазой атмосферы двухпараметрическим методом эквивалентной массы [4, 5] или методом прямого численного моделирования тонкой структуры спектров молекулярного поглощения [6].

Температура теплоносителя на выходе солнечного коллектора определяется из уравнения радиационного баланса:

$$C_p D \Delta T = F^*(t) \bar{\xi} q_{HO}, \quad (4)$$

где $\Delta T = T - T_{пв}$, C_p – теплоемкость воды; D – производительность тепловодоснабжения; $T_{пв}$ – температура питательной воды на входе солнечного коллектора.

Для поддержания постоянной температуры на выходе теплового преобразователя необходимо менять производительность водоснабжения пропорционально величине $F^*(t)$ в течение светового дня, что реализовать достаточно проблематично. В этом заключается основной недостаток, ограничивающий теплоэнергетическое использование солнечных преобразователей.

Оценим влияние антропогенных воздействий на работу установок СГВ. Это влияние проявляется вследствие усиления поглощения СИ промышленными

выбросами в атмосферу газовых ингредиентов и зольных образований, антропогенного влияния на распределение облачности по земному шару и его временным вариациям, роста влагосодержания в атмосфере в результате парникового эффекта атмосферы, роста концентрации тропосферного озона. Установлено, что в окрестности крупных городов осадков выпадает в два раза больше, что снижает перекрытие небосвода облачностью нижнего и среднего ярусов. Снижается перекрытие небосвода облачностью по мере течения воздушной массы вглубь континентов. Выпадение сажистого золя на защищающее покрытие установки СГВ снижает величину $F^*(t)$.

Снижение перекрытия небосвода облаками приводит к увеличению значения $F^*(t)$. Обратим внимание на то обстоятельство, что рост оптической толщины атмосферы за счет поглощения излучения золев возрастает обратно пропорционально $\cos\theta_0$, а для газовых компонентов – обратно пропорционально $(\cos\theta_0)^m$, где m принимает различные значения для различных ингредиентов в диапазоне $\{0,4;0,8\}$. В связи с этим степень влияния золя на снижение величины $F^*(t)$, по сравнению с влиянием газовых ингредиентов, возрастает с ростом зенитного угла $\theta_0(t)$ наблюдения Солнца. Антропогенные воздействия на приток СИ проявляются через его поглощение углеводородами, окислами азота, озоном, промышленным золем, диоксидом серы антропогенно-возмущенными облаками.

Снижение КПД установки СГВ определяется отражением СИ от защитного покрытия и потерями тепла на наружное охлаждение, отличием коэффициента черноты от единицы ($\bar{\xi} < 1$), поглощением СИ защитным покрытием. Величина

$$P_i(\theta_0^*, \varphi^*) = \bar{\delta}_i(\theta_0^*, \varphi_0^*) \cdot \bar{\tau}_i(\theta_0^*, \varphi_0^*), \quad (5)$$

где

$$\bar{\delta}_i(\theta_0^*, \varphi_0^*) = (\bar{n}^2 - 1)(\bar{n}^2 + 1), \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_i = \bar{k} \exp(-2\bar{k}d_i), \quad (7)$$

$\bar{n}$ – действительная часть показателя преломления; $\bar{k}$ – коэффициент поглощения материала защитного покрытия; d_i – эффективная толщина защитного покрытия для ситуации i .

В случае двухслойного защитного покрытия

$$P_i(\theta_0^*, \varphi^*) = \bar{\delta}_i^2(\theta_0^*, \varphi^*) \cdot \bar{\tau}_i^2(\theta_0^*, \varphi_0^*). \quad (8)$$

В табл. 1 приведены коэффициенты отражения δ для стекла, полученные с учетом многократного переотражения в зависимости от зенитного угла падения солнечного излучения θ° на поверхность СГВ.

Таблица 1

Зависимость величин δ и δ^2 от зенитного угла Солнца θ°

Зенитный угол θ°	δ	δ^2
0°	0,925	0,85
30°	0,92	0,84
60°	0,85	0,72
70°	0,78	0,53

На рис.1 показаны примеры рассчитанных спектров прозрачности атмосферы для различных углов визирования в диапазоне зенитных углов $0-90^\circ$, вычисленных для среднеглобальной модели атмосферы в условиях безоблачной атмосферы с использованием параметризации функции спектрального пропускания (ФСП) [8] с учетом всех газовых ингредиентов атмосферы и атмосферного аэрозоля. Из рисунка видно, что степень рассеяния СИ с увеличением зенитного угла θ возрастает более интенсивно, чем влияние поглощения газовой фазой атмосферы. Это обусловлено отличием скорости роста оптической толщины для газовой и дисперсной фаз атмосферы с ростом зенитного угла.

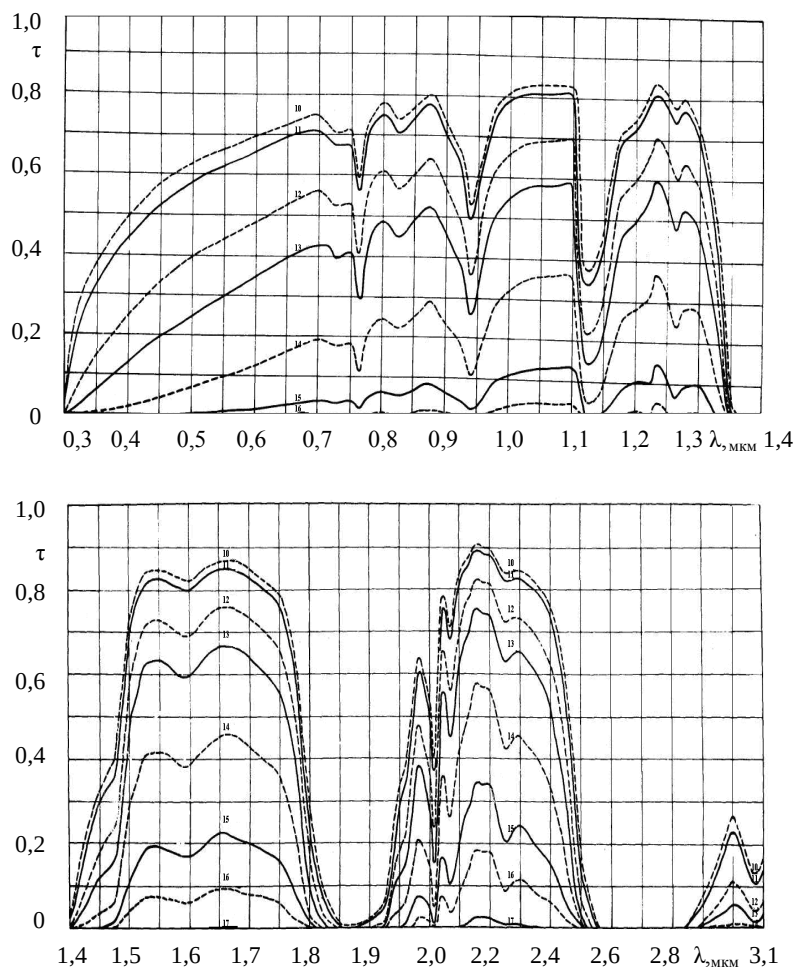


Рис. 1. Спектральная прозрачность атмосферы в области спектра 0,3-31 мкм при зенитных углах визирования $\theta(z_1)$: 10– 0° , 11– 30° , 12– 60° , 13– 70° , 14– 80° , 15– 85° , 16– 87° , 17– 89° , 18– 90° , 19– $90^\circ 20'$.
а) область спектра 0,3–1,04 мкм; б) область спектра 1,4–3,1 мкм

В случае СЭС, СТС воспринимающей поверхностью для СИ служит система зеркал, фокусирующая излучение на поверхность трубной системы парогенератора. Паропроизводительность D парогенератора вычисляется из энергетического баланса между полезно использованным приходящим на зеркальную систему потоком СИ и тепловой энергией пара (энтальпия теплоносителя + его энергия фазового перехода).

При моделировании оптических характеристик (ОХ) атмосферного, антропогенного аэрозолей и облаков использована электронная база данных ОХ, подготовленная с применением расчетных данных полидисперсных ансамблей частиц различного химического состава, разработанная в интересах глобального моделирования радиационного теплообмена [10] и в средах, возмущенных сильными природными и антропогенными воздействиями [11–13].

Влияние антропогенных выбросов в атмосферу на эффективность функционирования солнечных фотоэлектрических станции (СФЭС)

В случае применения в качестве приемников излучения фотоэлектрических модулей воспринимаемый поток СИ преобразуется в электрическую энергию солнечных батарей и определяется соотношением

$$W = \int_{\Delta\lambda} F_{\lambda\Gamma} \downarrow \cdot \delta_{\lambda a} \cdot \eta_{\lambda} d\lambda, \quad (9)$$

где $F_{\lambda\Gamma} \downarrow$ – спектральный поток СИ на внешней границе атмосферы; η_{λ} – спектральная зависимость коэффициента преобразования солнечной радиации в электрическую энергию; $\Delta\lambda$ – спектральный диапазон чувствительности фотоэлементов.

В случае безоблачной атмосферы для расчетов потоков СИ целесообразно использовать метод разложения решения по кратности рассеяния, позволяющий учесть поглощение излучения в рассеивающей излучение атмосфере по аналитическим ФСП [5]. Для облачной атмосферы наиболее надежно применение метода многопотокового приближения в расчетах потоков нисходящего излучения $F \downarrow$. Прямые засветки СИ $F \downarrow_{\Pi}$ приёмных площадок учитываются по спектрам прозрачности $\tau_{\lambda}(\theta)$ атмосферы [8]:

$$F \downarrow_{\Pi} = \int_{\Delta\lambda} F_{\lambda C}(\theta) \downarrow \cdot \tau_{\lambda}(\theta) d\lambda, \quad (10)$$

где $F_{\lambda C} \downarrow$ – спектральная облученность Солнцем внешней границы атмосферы; θ – зенитный угол.

Для примера в табл.2, 3 приведены зависимости спектральных альбедо $\delta_{\lambda a}$ в спектральном диапазоне 0,3–0,8 мкм для различных зенитных углов Солнца θ безоблачной атмосферы. Суточные вариации θ от времени суток вычисляются по онлайн- калькулятору [7] для любого места земного шара.

Таблица 2

Спектральное альбедо безоблачной фоновой атмосферы при наблюдении с подстилающей поверхности (θ – зенитный угол Солнца, λ – длина волны)

θ , град	λ , мкм							
	0,300	0,347	0,400	0,500	0,550	0,600	0,694	0,800
0,0	0,01758	0,2504	0,1722	0,08648	0,06246	0,04898	0,03587	0,02494
5,0	0,01708	0,2640	0,1845	0,09867	0,07251	0,05850	0,04273	0,03099
10,0	0,01658	0,2775	0,1967	0,1109	0,08256	0,06802	0,04958	0,03705
15,0	0,01608	0,2911	0,2006	0,1137	0,09262	0,07754	0,05643	0,04310
30,0	0,01457	0,3138	0,2193	0,1263	0,1036	0,08701	0,06326	0,04843
45,0	0,01197	0,3563	0,2555	0,1506	0,1240	0,1045	0,07654	0,05883
60,0	0,008280	0,4306	0,3241	0,1994	0,1652	0,1402	0,1046	0,08109
75,0	0,005156	0,5532	0,4632	0,3161	0,2652	0,2293	0,1809	0,1440
80,0	0,005111	0,6006	0,5360	0,3934	0,3325	0,2919	0,2422	0,1977
85,0	0,005066	0,6335	0,6127	0,5015	0,4253	0,3844	0,3613	0,3139

Таблица 3

Спектральное альbedo безоблачной атмосферы с городской дымкой при наблюдении
противоизлучения с подстилающей поверхности (θ – зенитный угол Солнца, λ – длина волны)

θ , град	λ , мкм							
	0,300	0,347	0,400	0,500	0,550	0,600	0,694	0,800
0,0	0,0175	0,1250	0,1111	0,0624	0,0519	0,0411	0,0301	0,0216
5,0	0,0169	0,1321	0,1245	0,0692	0,0611	0,0584	0,0369	0,0274
10,0	0,0161	0,1392	0,1353	0,0784	0,0713	0,0599	0,0428	0,0314
15,0	0,0159	0,1462	0,1405	0,0795	0,0801	0,0694	0,0459	0,0336
30,0	0,0141	0,1519	0,1654	0,0899	0,0824	0,0782	0,0541	0,0386
45,0	0,0111	0,1532	0,1896	0,1154	0,1114	0,0899	0,0614	0,0486
60,0	0,0081	0,2163	0,2511	0,1610	0,1433	0,1198	0,0812	0,0649
75,0	0,0050	0,2281	0,3214	0,2594	0,2141	0,1508	0,1622	0,0999
80,0	0,0049	0,3003	0,4192	0,3114	0,2645	0,2251	0,1914	0,1391
85,0	0,0048	0,3167	0,4853	0,4153	0,3664	0,3116	0,2863	0,2342

На рис. 2 показана зависимость отношения спектральных коэффициентов σ_a^a/σ_a сечений поглощения σ_a^a к сечению ослабления излучения σ_a от мнимой части комплексного показателя преломления χ для полидисперсного городского аэрозоля при различных значениях длин волн λ , характеризующих сильную зависимость оптических характеристик атмосферного аэрозоля от антропогенных выбросов сажевого золя. Характерной особенностью сажевого золя является то обстоятельство, что частицы сажевого золя практически не рассеивают излучение в заднюю полусферу.

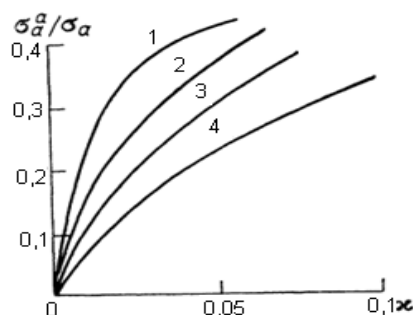


Рис. 2. Зависимость отношения спектральных коэффициентов σ_a^a/σ_a от мнимой части комплексного показателя преломления для различных длин волн λ , мкм: 1 – 0,3; 2 – 0,69; 3 – 1,06; 4 – 1,7

Сажевый золь оказывает значительное влияние на ОХ частиц облаков в связи с захватом тонко-дисперсной фракции сажевого золя частицами облаков. Поток частиц, диффундирующих в облако, определяется соотношением

$$F_p = \int \int_{Rr} 4\pi R D(r) \frac{\partial N(r)}{\partial r} dr \frac{\partial N(R)_0}{\partial R} dR, \quad (11)$$

где $D(r)$ – коэффициент диффузии частиц (меняется в диапазоне $10^{-5} \div 10^{-6}$ см²/сек для частиц более 0,1 мкм); $\frac{\partial N(r)}{\partial r}$ – распределение числа частиц аэрозоля в объеме 1 см³;

$\frac{\partial N(R)}{\partial R}$ – распределение числа частиц облачности в объеме 1 см³; r, R – радиусы частиц аэрозоля и облачности. Для числовой плотности частиц облака

$$N_0 = \int \frac{\partial N(R)}{\partial R} dR = 10^3 \text{ см}^{-3} \text{ и числовой плотности частиц аэрозоля } N_a = \int \frac{\partial N(r)}{\partial r} dr = 10^5 \text{ см}^{-3}$$

в течение одного часа будет захвачено $\approx 10\%$ частиц дыма, а за время жизни облака $\tau_0 = 3$ часа облаком будет захвачено $\approx 30\%$ дыма в пределах облачного покрова.

В связи с ростом эффективного сечения поглощения частицей облака последние испаряются, образуя гигантские частицы радиуса $r > 0,5$ мкм, которые оседают в результате седиментации на подстилающую поверхность. Более мелкие частицы могут служить ядрами конденсации для образования нового облака. Этот процесс очищения атмосферы от дымового и пылевого золя, является более эффективным, чем обычная коагуляция. Его эффективность может усиливаться благодаря электрическим свойствам заряженных частиц.

Для гомогенной коагуляции частиц временной рост частицы описывается простой моделью:

$$r/r_0 = \left[1 + \frac{1}{2} K n_0 \frac{\ln(1 + \alpha t)}{\alpha} \right]^{1/3}, \quad (12)$$

где K – коэффициент броуновской коагуляции; n_0 – число частиц в единице объема; α^{-1} – время, в течение которого размер частиц увеличится в два раза.

Для гетерогенной многокомпонентной коагуляции частиц распределение числа частиц $f[r(t)]$ определяется соотношением

$$\begin{aligned} \frac{f[r(t)]}{f_0(r)} = & \sum_i \left[1 + \frac{1}{2} k_i n_{0i} \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_i t}{\alpha_i} \right\} \right]^{1/3} + \\ & + \sum_{i \neq k} \left[1 + \frac{1}{2} k_{ik} (n_{0i} \cdot n_{0k})^{1/2} \cdot \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_{ik} t}{\alpha_{ik}} \right\} \right]^{1/3} \end{aligned} \quad (13)$$

где $f[r(t)]$ – временная зависимость распределения частиц по размерам; i – номер фракции; k_i – коэффициент броуновской коагуляции для компонента i ; $k_{i,k}$ – коэффициент броуновского взаимодействия частиц разных фракций i, k .

При выполнении расчетов возможно применение итерационной процедуры в расчетах по времени Δt . Зависимость альбедо δ от массовой концентрации сажи рассмотрена в работе [15]. На коагуляцию частиц аэрозоля сильное влияние оказывают электрические свойства частиц.

Отношения эффективности функционирования СФЭС в условиях антропогенно невозмущенной атмосферы и атмосферы с учетом воздействия городской дымки определяются соотношением

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{f_1 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{r\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda + \int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \tau_{r\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right) + f_2 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{0r\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right)}{f_1 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda + \int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \tau_{\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right) + f_2 \left(\int_{\lambda} F_{\lambda}(\theta) \cdot \delta_{0\lambda}(\theta) \cdot k_{\lambda} d\lambda \right)}, \quad (14)$$

где k_{λ} – спектральная зависимость коэффициента преобразования СИ; f_1 – вероятность безоблачного состояния атмосферы; f_2 – вероятность перекрытия небосвода облачностью, $f_1 + f_2 = 1$.

На рис. 3-4 для примера приведены рассчитанные эффективности $\eta(\theta)$ и отношения эффективности функционирования $\frac{\eta(\theta)}{\eta_0(\theta)}$ в условиях безоблачной атмосферы и атмосферы с учетом городской дымки в зависимости от зенитного угла Солнца кремниевых фотоэлектрических модулей с тонкой пленкой халькогенидов (кадмиевое покрытие *CdTe/CIS/CIGS* при толщине пленки 1,25 мкм) для широты 45° для июня месяца при оптической толщине облаков $\tau_0 = 10$. Спектральный коэффициент преобразования СИ k_λ взят из литературы [16, 17].

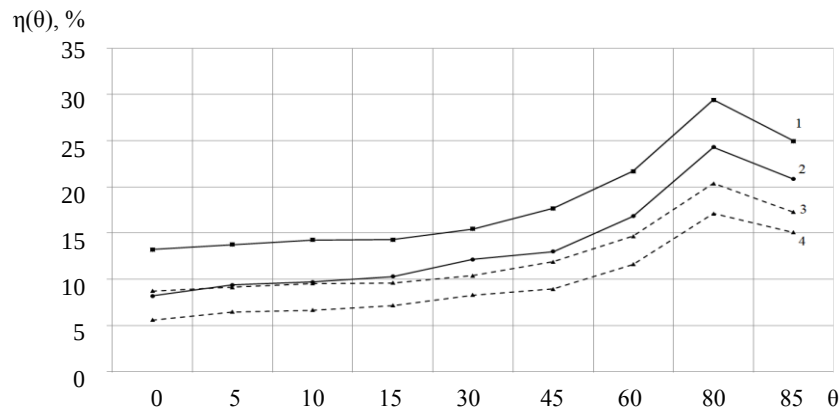


Рис. 3. Эффективность функционирования в условиях антропогенно безоблачной атмосферы и атмосферы с учетом городской дымки для кремниевых фотоэлектрических модулей (1, 2) и фотоэлектрических модулей с тонкой пленкой халькогенидов (3, 4)

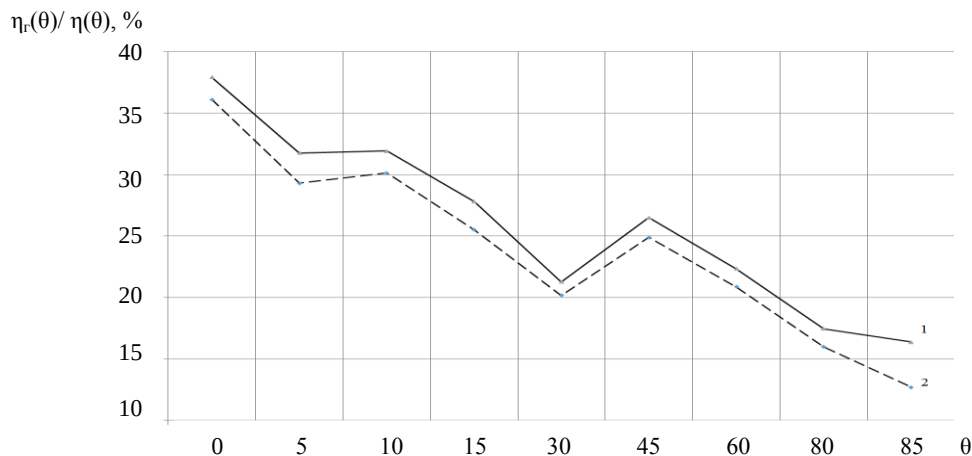


Рис. 4. Отношения эффективности функционирования в условиях антропогенно невозмущенной атмосферы с учетом городской дымки для кремниевых фотоэлектрических модулей (1) и фотоэлектрических модулей с тонкой пленкой халькогенидов (2)

Сравнение спектральных облученностей СИ для фоновой модели атмосферы и атмосферы, возмущенной антропогенными выбросами, показывает, что антропогенные воздействия на атмосферу в условиях городской дымки занижают поток СИ на тепловоспринимающую поверхность в среднем на 24–30%, снижая эффективность работы СФЭУ. Более значительно оказывает влияние загрязнение облаков сажевым промышленным аэрозолем на облученность приемника СИ солнечной энергетической

© Проблемы энергетики, 2016, № 3-4

установки (СЭУ). Например, при толщине чистого облачного покрова $\tau_0=5$ рассеянное СИ, достигающее тепловоспринимающей поверхности, составляет 45% от потока СИ W_{Π} на внешней границе атмосферы, в то время как уменьшение вероятности выживания кванта до значения $\omega_0=0,98$, вследствие захвата частицами облака сажевого золя, приводит к снижению облученности СИ на тепловоспринимающей поверхности до значения 27% от W_{Π} . Снижение эффективности функционирования СФЭУ составит при этом 40%. В связи со значительным влиянием антропогенных возмущений на эффективность работы СЭУ их необходимо размещать за пределами городской черты. С увеличением оптической толщины облака снижается поток СИ на тепловоспринимающую поверхность и, следовательно, снижается эффективность функционирования СЭУ.

Выводы

1. Получены соотношения и исходная информация, необходимы для вычисления полного потока СИ, достигающего тепловоспринимающей поверхности преобразователя СЭУ, методом численного моделирования радиационного теплообмена, в том числе и в средах, подверженных сильным антропогенным и природным воздействиям.

2. Выполнены расчеты потоков СИ на тепловоспринимающую поверхность СЭУ для фоновой атмосферы и атмосферы, возмущенной сильными антропогенными воздействиями. Полученные результаты расчетов использованы для оценки влияния антропогенных возмущений на функционирование СФЭУ с различными фотоэлементами.

Summary

The modeling of complex systems, radiant heat transfer in anthropogenically disturbed the atmosphere, solar electric and thermal power plants are considered. The structural diagram of the simulation of solar radiation on the tributaries heat perceptive surface and solar thermal power plants is discussed. Calculations of the spectral intensities and flux of solar radiation are carried out taking into account the selectivity of the molecular absorption of the ingredients of the radiation of the gas phase of the atmosphere, scattering and absorption of radiation by atmospheric aerosols and clouds in view statistics of their distribution according to the station's location and time of year.

Key words: radiation heat transfer, solar radiation, solar thermal plants.

Литература

1. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.Л., Малинин Н.К. Солнечная энергетика М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 276 с.
2. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Федоров Ю.И. и др. Метод полуаналитического моделирования радиационных притоков коротковолновой радиации в вертикально-неоднородной поглощающей и рассеивающей атмосфере // ДАН. 1990. Т.315, №3. С. 580–583.
3. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Федоров Ю.И., Якупова Ф.С. Численное моделирование спектральных потоков коротковолновой радиации в облачной атмосфере // ДАН СССР. 1988. Т.299, №2. С. 333–336.
4. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Тепловое излучение планет. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 264 с.
5. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков В.Д. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 224 с.
6. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Хамидуллина М.С. (Садыкова М.С.) Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными

воздействиями. I. Структурные и математические модели. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №3–4. С.26–35.

7. Онлайн калькулятор: Азимут и высота Солнца над горизонтом. [http://www.planetcalc.ru/320/\(17.03.12\)](http://www.planetcalc.ru/320/(17.03.12)).

8. Москаленко Н.И., Мирумянц С.О. Атлас спектров прозрачности по произвольно ориентированным трассам атмосферы. М: ЦНИИ и ТЭИ, 1979. 494с.

9. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Терзи В.Ф., Якупова Ф.С. Оптические характеристики для различных моделей облаков // Труды ГГО. 1982. Вып. 489. С.32–50.

10. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С. Глобальное моделирование полей излучения и радиационного теплообмена // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 6. С.89–98.

11. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Хамидуллина М.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. II. Пылевые и дымовые выносы в тропосферу. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №7–8. С.3–13.

12. Москаленко Н.И., Родионов Л.В., Хамидуллина М.С., Афанасьев И.А. Численное моделирование сложного радиационного теплообмена. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №1–2. С 33–43.

13. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Сафёрова Т.М. и др. Автоматизированная система моделирования оптических характеристик атмосферы на ЭВМ ЕС // ДАН СССР. Т.318, № 3. 1991. С.580–583.

14. Казаченко С.В. и др. Солнечная энергетика в Крыму. Симферополь, 2008. 201 с.

15. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Хамидуллина М.С. (Садыкова М.С.) Зональное моделирование парникового эффекта атмосферы и антропогенных изменений климата. // Альтернативная энергетика и экология. 2014. №3(143). С. 48–59.

16. Харченко Н.М., Хрипунов Г.С., Ли Т.А. Оптимизация технологии «хлоридной» обработки тонких пленок халькогенидов кадмия. // ФИП. 2008. Т.6, №3–4. С.128–133.

17. www.mash-xx.info.ru.

Поступила в редакцию

16 февраля 2016 г.

Москаленко Николай Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Котельные установки и парогенераторы» (КУПГ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Хамидуллина Марьяна Салаватовна – аспирант 3-го года обучения кафедры «Котельные установки и парогенераторы» (КУПГ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(904)6661125. E-mail: maryana1125@mail.ru.

Сафиуллина Яна Салаватовна – канд. техн. наук, кафедра «Котельные установки и парогенераторы» (КУПГ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).