



ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ имени М.В. Ломоносова





МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

**Материалы
Всероссийской научной конференции
с международным участием
и XI научной молодежной школы**

3–6 декабря 2018 года, Москва



Москва – 2018

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАБОТУ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ СТАНЦИЙ

Москаленко Н.И., Додов И.Р., Хамидуллина М.С.,
Сафиуллина Я.С.

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация. 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 поток 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.

MODELING OF ANTHROPOGENIC IMPACTS ON WORK OF SOLAR ELECTRIC AND THERMAL STATIONS

Moskalenko N.I., Dodov I.R., Khamidullina M.S., Safiullina Ya.S.
Kazan State Power Engineering University

Abstract. The modeling of complex radiative heat exchange in systems of anthropogenically disturbed atmosphere-solar electric and thermal stations is considered. A structural scheme for simulating the influx of solar radiation into the heat-receiving surface of solar thermal and electric power stations is discussed. Calculations of spectral intensities and the flux of solar radiation are performed taking into account the selectivity of molecular absorption of radiation by the ingredients of the atmospheric gas phase, the scattering and absorption of radiation by atmospheric aerosol and clouds, taking into account the statistics of their distribution, depending on the location of stations and the time of year.

Keywords: Radiation heat transfer, solar radiation, solar thermal stations.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что использование Солнца как источника тепловой и электрической энергии 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 [2–5] 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 в [2–5] методы расчетов спектральных интенсивностей и потоков коротковолновой и длинноволновой радиации на подстилающую поверхность 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, которые точно вычисляются для любой локализации места расположения установки СГВ по [10]. 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 положения 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 И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Полный поток излучения, достигающий тепловоспринимающей поверхности преобразователя, определяется соотношением

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

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, двухъярусное перекрытие нижнего и среднего ярусов, двухъярусное перекрытие нижнего и верхнего ярусов, двухъярусное перекрытие среднего и верхнего ярусов, трехъярусное перекрытие небосвода облаками нижнего, среднего и верхнего ярусов; при этом удовлетворяется условие $\sum_i f_i = 1$), s – площадь тепловоспринимающей поверхности тепло-

вого 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 противоизлучения 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

$$F_6^*(t) = F^*(t)\bar{\xi}, \quad (2)$$

Путем механической и технологической обработки тепловоспринимающей поверхности возможно достигнуть значений $\bar{\xi} = 0.96 \div 0.98$. Тыльную сторону солнечного коллектора желательно покрывать светоотражающим 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 $\bar{F}_i(s, \theta^*, \phi^*, t)$ 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 [9]. Отметим, что в случае перекрытия небосвода облачностью значения $\bar{F}_i(s, \theta^*, \phi^*, t)$ определяются только рассеянным излучением. Во всех случаях поглощение излуче-

ния атмосферой вычисляется с учетом острой селекции спектров поглощения газовой фазой атмосферы двухпараметрическим методом эквивалентной массы [4,9] или методом прямого численного моделирования тонкой структуры спектров молекулярного поглощения [2].

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

Для поддержки 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 в глубь 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 землем возрастает обратно пропорционально $\cos \theta_0$, а для газовых компонентов – обратно пропорционально $(\cos \theta_0)^m$, где m принимает различ-

ные 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 таблице 1 приведены коэффициенты отражения δ для стекла, полученные с учетом многократного переотражения в зависимости от зенитного угла падения солнечного излучения θ^0 на поверхность СГВ.

ТАБЛИЦА 1
ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИН δ И δ^2 ОТ ЗЕНИТНОГО УГЛА СОЛНЦА θ^0

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

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 [7] и в средах, возмущенных сильными природными и антропогенными воздействиями [5,9].

В случае применения в качестве приемников излучения фотоэлектрических модулей воспринимаемый поток СИ преобразуется в электрическую энергию солнечных батарей и определится 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, позволяющим учесть поглощение излучения в рассеивающей излучение атмосфере по аналитическим ФСП [2]. Для облачной атмосферы наиболее надежно применение метода многопотокового приближения в расчетах потоков нисходящего излучения $F \downarrow$. Прямые засветки СИ $F \downarrow_{II}$ приёмных площадок учитываются по спектрам прозрачности $\tau_{\lambda}(\theta)$ атмосферы [4]:

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

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

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

$$F_p = \int_R \int_r 4\pi r D(r) \frac{\partial N(r)}{\partial r} dr \frac{\partial N(R)}{\partial R} dR, \quad (11)$$

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 объёме 1 см³,

$\frac{\partial N(R)}{\partial R}$ – распределение числа частиц облачности в объёме 1 см³;

r, R – радиусы частиц аэрозоля и облачности.

Для числовой плотности частиц облака $N_0 = \int \frac{\partial N(R)}{\partial R} dR = 10^3 \text{ см}^{-3}$

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.

Выполненные расчеты эффективности функционирования СЭС в условиях ясной и облачной атмосферы и атмосферы, возмущенной антропогенными воздействиями для различных фотоэлектрических приёмников излучения [8] показали значительное влияние антропогенных возмущений на работу СЭС [11].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.Л. Кузнецова, Н.К. Малинин. Солнечная энергетика –М.: Издательский дом МЭИ. 2008. – 276 с.
- [2] К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко, Ю.И. Федоров, Ф.С. Якупова. Численное моделирование спектральных потоков коротковолновой радиации в облачной атмосфере. –ДАН СССР. 1988. Т. 299. № 2. С. 333–336.
- [3] К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко, В.Д. Поздняков. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 224 с.
- [4] Н.И. Москаленко, С.О. Мирумянц. Атлас спектров прозрачности по произвольно ориентированным трассам атмосферы. М: ЦНИИ и ТЭИ. 1979. 494 с.
- [5] Н.И. Москаленко, Я.С. Сафиуллина, М.С. Хамидуллина. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. II. Пылевые и дымовые выносы в тропосферу // Изв. Вузов. Проблемы энергетики». № 7–8. Казань: 2014. С. 3–13.
- [6] С.В. Казаченко и др. Солнечная энергетика в Крыму. –Симферополь. 2008. 201 с.
- [7] Н.И. Москаленко, Я.С. Сафиуллина, М.С. Хамидуллина. Зональное моделирование парникового эффекта атмосферы и антропогенных изменений климата // Альтернативная энергетика и экология. № 3(143). 2014. С. 48–59.
- [8] Н.М. Харченко, Г.С. Хрипунов, Т.А. Ли. Оптимизация технологии «хлоридной» обработки тонких пленок халькогенидов кадмия // ФИП. Т. 6. № 3–4. 2008. С. 128–133.
- [9] К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко. Тепловое излучение планет. Л.: Гидрометеоиздат. 1977. 264 с.
- [10] Онлайн калькулятор: Азимут и высота Солнца над горизонтом. [http://www.planetcalc.ru/320/\(17.03.12\)](http://www.planetcalc.ru/320/(17.03.12)).
- [11] Н.И. Москаленко, М.С. Хамидуллина, Я.С. Сафиуллина. Влияние антропогенных воздействий на работу солнечных электрических и тепловых станций // Изв. Вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 29–39.