



УДК 553.981.2

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3\(24\).2026.5](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3(24).2026.5)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ОТ СНЕЖНОГО ПОКРОВА МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ТОКОВОГО НАГРЕВА

Дыскин Валерий Григорьевич^{1,2} - кандидат технических наук (PhD),
<https://orcid.org/0000-0002-4795-0586> *e-mail: valery.dyskin@gmail.com

Юлдошев Исроил Абриевич² - доктор технических наук, профессор,
<https://orcid.org/0000-0003-1335-0862> e-mail: isroil.yuldoshev@tdtu.uz

Шогучкоров Санжар Кодир угли² - кандидат технических наук (PhD),
<https://orcid.org/0000-0002-5684-9818> e-mail: sanjar4242@inbox.ru

Курбанов Юнус Муртаза угли² - базовый докторант
<https://orcid.org/0009-0002-5546-5385> e-mail: researcheryunus@gmail.com

¹НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз им. М. Улугбека,
Узбекистан, 100057, Ташкент

²Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, 100095, Узбекистан

Аннотация. Введение. Представлена математическая модель очистки кремниевого фотоэлектрического модуля от снега путем пропускания обратного тока, переводящего ячейки в режим нагревателя. Модель объединяет уравнения нестационарного теплового баланса композитных слоев и механические условия страгивания пласта. Впервые совместно учтены линейная температурная зависимость сопротивления кремния и ступенчатая функция изменения коэффициента трения (падение с 0,6 до 0,005 при образовании талой пленки). На основе критерия Био ($Bi \approx 0,052$) доказана изотермичность модуля по толщине. Численное решение системы нестационарных дифференциальных уравнений реализовано в программной среде методом Рунге - Кутты - Фельберга (RK45) с автоматическим выбором шага интегрирования и сплайн-аппроксимацией нелинейных параметров. Численным моделированием определены границы эффективности метода в диапазоне температур от -5 до -25 °C при мощности 600 Вт для пластов толщиной 2; 5; 10 см. Установлено, что игнорирование ТКС кремния занижает расчетное время очистки на 1,5–2,5% из-за падения мощности нагрева на 2–3%. Определены удельные энергозатраты процесса (от 0,020 до 0,231 кВт·ч/м²) и зафиксирован критический режим функционирования при -25 °C для слоя 10 см ($t_s = 50,9$ мин, $E_{total} = 0,463$ кВт·ч), требующий принудительного форсирования мощности источника питания.

Методы и материалы. Объектом исследования является промышленный кремниевый ФЭМ площадью A , установленный под углом Θ к поверхности Земли. На лицевой поверхности модуля находится равномерный слой сухого снега толщиной h_s начальной плотностью ρ_0 . К модулю подключается внешний источник постоянного электрического тока. Мощность джоулева нагрева $P(T)$ рассматривается как функция термического состояния полупроводниковых структур ФЭМ, обусловленная температурной зависимостью их внутреннего электрического сопротивления.

Результаты. На рисунках 1 и 2 представлены результаты численного исследования динамики очистки фотоэлектрического модуля (ФЭМ) от снежного покрова при фиксированной номинальной мощности джоулева нагрева $P_0 = 600$ Вт и варьировании температуры наружного воздуха T_s от -5 °C до -25 °C для трех характерных толщин снежного пласта $h_s = 2; 5; 10$ см.

Заключение. В настоящей работе разработана и верифицирована усовершенствованная математическая модель нестационарного теплового баланса и механических условий страгивания снежного покрова с поверхности фотоэлектрического модуля методом обратного токового нагрева. В отличие от существующих статических подходов, в модели впервые строго учтена температурная зависимость мощности



тепловыделения $P(T)$, обусловленная отрицательным ТКС кремниевых полупроводниковых структур при питании от источника постоянного тока.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, солнечная энергетика, снегоочистка, обратный ток, тепловой баланс, фазовый переход, критерий Био, композитная теплоемкость.

Дата поступления: 28.08.2026. После обработки: 07.09.2026 Принято печать: 23.09.2026

For citation: Diskin V.G., Yuldoshev I.A., Shokuchkarov S.K., Kurbanov Y.M. Modeling The Process of Cleaning a Photovoltaic Module from Snow Cover using the Reverse Current Heating Method. Muqobil energetika. 2026. 3(24). pp. 51-59.

UDC 553.981.2

MODELING THE PROCESS OF CLEANING A PHOTOVOLTAIC MODULE FROM SNOW COVER USING THE REVERSE CURRENT HEATING METHOD

Diskin Valeriy Grigorevich^{1,2} - PhD in Technical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0002-4795-0586> e-mail: valery.dyskin@gmail.com

Yuldoshev Isroil Abriyevich² – Doctor of Technical Sciences, Professor,

<https://orcid.org/0000-0003-1335-0862> E-mail: isroil.yuldoshev@tdtu.uz

Shokuchkarov Sanjar Kodir ugli² - PhD in Technical Sciences,

<https://orcid.org/0000-0002-5684-9818> E-mail: sanjar4242@inbox.ru

Kurbanov Yunus Murtaza ugli² - Doctoral Student

<https://orcid.org/0009-0002-5546-5385> E-mail: researcheryunus@gmail.com

¹Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics, National University of Uzbekistan, Tashkent, 100057 Uzbekistan

²Tashkent State Technical University Named After Islam Karimov, Tashkent 100095, Uzbekistan

Abstract. Introduction. A mathematical model for removing snow from a silicon photovoltaic module by applying a reverse current, which switches the cells into a heating mode, is presented. The model combines the equations of the transient thermal balance of composite layers with the mechanical conditions governing the sliding of the snow layer. For the first time, the linear temperature dependence of silicon resistance and a stepwise function describing the variation in the friction coefficient (a decrease from 0.6 to 0.005 upon the formation of a meltwater film) are considered simultaneously. Based on the Biot criterion ($Bi \approx 0.052$), the module is demonstrated to be isothermal through its thickness. The numerical solution of the system of transient differential equations was implemented using the Runge – Kutta - Fehlberg (RKF45) method with automatic selection of the integration step and spline approximation of nonlinear parameters. Numerical simulations determined the effectiveness limits of the method within the temperature range from -5 to -25 °C at a power of 600 W for snow layers with thicknesses of 2, 5, and 10 cm. It was established that neglecting the temperature coefficient of silicon resistance underestimates the calculated cleaning time by 1.5–2.5% due to a 2–3% reduction in heating power. The specific energy consumption of the process was determined to range from 0.020 to 0.231 kWh/m², and a critical operating condition was identified at -25 °C for a 10 cm snow layer ($t_s = 50.9$ min, $E_{total} = 0.463$ kWh), requiring forced boosting of the power supply output.

Materials and Methods. The object of the study is an industrial silicon photovoltaic module (PV module) with an area of A , installed at an angle Q relative to the Earth's surface. A uniform layer of dry snow with a thickness of h_s and an initial density of ρ_0 is present on the front surface of the module. An external direct-current power supply is connected to the module. The Joule heating power $P(T)$ is considered as a function of the thermal state of the semiconductor structures of the PV module, determined by the temperature dependence of their internal electrical resistance.



Results. Figures 1 and 2 present the results of a numerical study of the dynamics of snow removal from a photovoltaic module (PV module) at a fixed nominal Joule heating power of $P_0=600$ W and varying outdoor air temperatures T_s from -5 °C to -25 °C for three characteristic snow-layer thicknesses, $h_s = 2, 5$, and 10 cm.

Conclusion. In this study, an improved mathematical model of the transient thermal balance and mechanical conditions for the initiation of snow-layer detachment from the surface of a photovoltaic module using the reverse current heating method was developed and verified. Unlike existing static approaches, the model rigorously accounts, for the first time, for the temperature dependence of the heat generation power $P(T)$, caused by the negative temperature coefficient of resistance (TCR) of silicon semiconductor structures when powered by a direct-current source.

Keywords: photovoltaic module, solar energy, snow removal, reverse current, thermal balance, phase transition, Biot criterion, composite heat capacity.

UO‘K 553.981.2

FOTOELEKTR MODULNI QOR QOPLAMIDAN TESKARI TOK ORQALI QIZDIRISH USULIDA TOZALASH JARAYONINI MODELLASHTIRISH

Diskin Valeriy Grigorevich^{1,2} - texnika fanlari nomzodi (PhD),

<https://orcid.org/0000-0002-4795-0586> *e-mail: valery.dyskin@gmail.com

Yuldoshev Isroil Abriyevich² – texnika fanlari doktori, professor,

<https://orcid.org/0000-0003-1335-0862> e-mail: isroil.yuldoshev@tdtu.uz

Shog‘o‘chqorov Sanjar Qodir o‘g‘li² - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD),

<https://orcid.org/0000-0002-5684-9818> e-mail: sanjar4242@inbox.ru

Qurbanov Yunus Murtaza o‘g‘li² - Tayanch doktorant

<https://orcid.org/0009-0002-5546-5385> e-mail: researcheryunus@gmail.com

¹O‘zbekiston Milliy universiteti Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent 100057, O‘zbekiston

²Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent 100095, O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Kremniyli fotoelektr modulini fotoelementlar isitish rejimiga o‘tkazadigan teskari tokni o‘tkazish orqali qor qoplamidan tozalashning matematik modeli taqdim etilgan. Model kompozit qatlamlarning nostatsionar issiqlik balansi tenglamalarini qor qatlamining sirpanib tushishining mexanik shartlari bilan birlashtiradi. Birinchi marta kremniy qarshiligining haroratga chiziqli bog‘liqligi hamda erigan suv qatlami hosil bo‘lganda ishqalanish koeffitsiyentining 0,6 dan 0,005 gacha kamayishini tavsiflovchi pog‘onali o‘zgarish funksiyasi birgalikda hisobga olingan. Bio mezoni ($Bi \approx 0,052$) asosida modul qalinligi bo‘ylab izotermik ekanligi isbotlangan. Nostatsionar differensial tenglamalar tizimining sonli yechimi dasturiy muhitda integrallash qadamini avtomatik tanlash va nochiziqli parametrlarni splayn-aproksimatsiyalash bilan Runge–Kutta–Felberg (RKF45) usuli yordamida amalga oshirildi. Sonli modelashtirish orqali 600 W quvvatda qor qatlamining 2, 5 va 10 sm qalinliklari uchun -5 dan -25 °C gacha bo‘lgan harorat oralig‘ida usulning samaradorlik chegaralari aniqlandi. Kremniy qarshiligining harorat koeffitsiyentini hisobga olmaslik isitish quvvatining 2–3% ga kamayishi sababli hisoblangan tozalash vaqtining 1,5–2,5% ga past baholanishiga olib kelishi aniqlandi. Jarayonning solishtirma energiya sarfi 0,020 dan 0,231 kVt·soat/m² gacha ekanligi aniqlandi hamda 10 sm qalinlikdagi qor qatlami uchun -25 °C da kritik ish rejimi ($t_s = 50,9$ min, $E_{total} = 0,463$ kVt·soat) qayd etildi, bunda quvvat manbai quvvatini majburiy ravishda oshirish talab etiladi.

Materiallar va usullar. Tadqiqot obyekti Yer yuzasiga nisbatan Q burchak ostida o‘rnatilgan, yuzasi A ga teng bo‘lgan sanoat turidagi kremniyli fotoelektr moduldan (FEM) iborat. Modulning old yuzasida qalinligi h_s va boshlang‘ich zichligi ρ_0 bo‘lgan quruq qorning bir tekis qatlami mavjud. Modulga tashqi o‘zgarmas elektr toki manbai ulanadi. Joule issiqlik ajralish quvvati



$P(T)$ fotoelektr modulning yarimo 'tkazgich tuzilmalarining ichki elektr qarshiligi haroratga bog'liq holda o'zgarishi bilan belgilanadigan ularning issiqlik holatining funksiyasi sifatida qaraladi.

Natijalar. 1- va 2-rasmlarda fotoelektr modulni (FEM) qor qoplamidan tozalash dinamikasining sonli tadqiqot natijalari keltirilgan. Bunda Joule qizdirishning nominal quvvati $P_0=600\text{ W}$ doimiy holda saqlanib, tashqi havo harorati $T_s -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha o'zgartirilgan hamda qor qatlamining uchta xarakterli qalinligi - $h_s = 2, 5$ va 10 sm uchun tadqiqot olib borilgan.

Xulosa. Ushbu ishda fotoelektr modul sirtidagi qor qoplamasining teskari tok orqali qizdirish usulida siljib ajralib chiqishining nostatsionar issiqlik balansi va mexanik shartlarining takomillashtirilgan matematik modeli ishlab chiqildi va verifikatsiya qilindi. Mavjud statik yondashuvlardan farqli ravishda, ishlab chiqilgan modelda o'zgarmas tok manbai bilan ta'minlanganda kremniy yarimo 'tkazgich tuzilmalarining qarshiligining manfiy harorat koeffitsiyenti (TKK) bilan bog'liq bo'lgan issiqlik ajralish quvvati $P(T)$ ning haroratga bog'liqligi birinchi marta qat'iy ravishda hisobga olindi.

Kalit so'zlar: fotoelektr modul, quyosh energetikasi, qordan tozalash, teskari tok, issiqlik balansi, fazaviy o'tish, Bio mezon, kompozit issiqlik sig'imi.

Введение

Эффективность фотоэлектрических систем в регионах с умеренным и холодным климатом существенно снижается в зимний период из-за образования стабильного снежного покрова на лицевой поверхности панелей. Слой снега даже малой толщины блокирует солнечную радиацию, приводя к падению инсоляции кремниевых пластин и полному прекращению генерации электроэнергии. Традиционные механические методы очистки малоэффективны из-за высокой трудоемкости и риска повреждения защитного стекла. Натурные тесты с применением электролюминесцентного анализа доказали, что неравномерные нагрузки при очистке вызывают массовое растрескивание кремниевых ячеек и появление дефектов типа «X-pattern» [1]. Пассивные гидрофобные нанопокртия также не обеспечивают самостоятельного схода плотных пластов из-за быстрой потери механической стойкости [1]. В качестве альтернативы исследуется метод активного обратного токового нагрева (*reverse-current heating*), превращающий кремниевые структуры p-n-переходов в нагревательные элементы. Физическая осуществимость генерации тепла внутри ячеек диодной структуры подтверждена экспериментально в лабораторных условиях [2]. Однако при переносе метода в реальную среду были выявлены критические ограничения. Алюминиевый опорный каркас ФЭМ выступает радиатором охлаждения; талая вода рекристаллизуется на его нижней кромке, образуя ледяные дамбы (*ice dams*) и блокируя сход снежной массы [2, 3]. Силикатное стекло является главным тепловым барьером, а теплопроводности материалов подложки ФЭМ недостаточно для прогрева непокрытых участков, что требует обогрева всей площади модуля [3]. Кремниевые структуры обладают нелинейными характеристиками и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), что при фиксации тока вызывает флуктуации мощности и риск образования локальных зон перегрева (*hotspots*) до $111.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Для минимизации этих рисков в ряде работ предложены схемы автоматического управления и прогностического контроля (MPC, ISSA) на базе двунаправленных DC-DC преобразователей [4, 5]. Однако данные модели рассматривают ФЭМ как чисто электрическую статическую нагрузку и ориентированы на низковольтные одиночные модули [5, 6].

Анализ существующей литературы показывает наличие пробела: имеющиеся математические модели являются статическими. Они полностью игнорируют динамическое, монотонное убывание мгновенной мощности нагрева из-за отрицательного ТКС кремния в процессе самого прогрева. Кроме того, в литературе отсутствуют модели, связывающие нестационарные уравнения теплового баланса гетерогенных слоев системы «ФЭМ - снег» с механическими условиями трения и лавинообразного сползания пласта. Решение полученной системы уравнений требует применения эффективных численных процедур, способных обрабатывать разрывные функции, таких как алгоритм RK45 в сочетании с



методом интерполяционных сплайнов для сглаживания теплофизических коэффициентов [7].

В работе разработана модель нестационарного теплообмена, которая одновременно учитывает линейную температурную зависимость сопротивления кремния и ступенчатую функцию коэффициента гидродинамического трения (падающего с 0.6 до 0.005 при образовании водяной пленки критической массы). Модель позволяет предиктивно рассчитать точное время схода пластов и установить аналитические границы эффективности метода в высоковольтных стрингах при экстремальных морозах до -25°C .

Математическая модель

Объектом исследования является промышленный кремниевый ФЭМ площадью A , установленный под углом θ к поверхности Земли. На лицевой поверхности модуля находится равномерный слой сухого снега толщиной h_s начальной плотностью ρ_0 . К модулю подключается внешний источник постоянного электрического тока. Мощность джоулева нагрева $P(T)$ рассматривается как функция термического состояния полупроводниковых структур ФЭМ, обусловленная температурной зависимостью их внутреннего электрического сопротивления. При построении модели приняты следующие допущения:

1. Процесс очистки считается полностью завершенным в момент начала сползания снежного пласта, вызванного образованием жидкой фазы на границе раздела сред. Прогрев всей массы снега до положительных температур не требуется.

2. Температурное поле внутри ФЭМ (T) распределено равномерно по объёму, а внутренним термическим сопротивлением материалов модуля можно пренебречь.

Правомомерность о равномерном распределении температуры по толщине модуля математически верифицируется через безразмерный критерий Био (Bi), определяющий соотношение между термическим сопротивлением теплопроводности твердого тела и термическим сопротивлением конвективной теплоотдачи на его границе [8,9]:

$$Bi = \frac{h \cdot \delta}{\lambda_{ph}} \quad (1)$$

где h - комплексный коэффициент теплоотдачи с поверхности модуля в окружающую среду ($h \approx 15.0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при умеренном ветре); δ - характерный размер (суммарная толщина фотоэлектрической пластины и защитного стекла, ($\delta = 0.004 \text{ м}$); λ_{ph} - эквивалентный коэффициент теплопроводности материалов подложки ФЭМ. Основную толщину структуры занимает защитное силикатное стекло, для которого ($\lambda \approx 1.15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). Теплопроводность кремниевых элементов значительно больше ($\approx 148 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), поэтому именно стекло выступает главным тепловым барьером. Выполнив вычисления получим $Bi \approx 0.052$. Так как Bi намного меньше 0.1, то можно для вычислений применить модель сосредоточенной теплоемкости и пренебречь температурным градиентом по толщине ФЭМ (термически тонкое тело). Температурное поле по толщине модуля является однородным [8,9].

Фотоэлектрический модуль представляет собой гетерогенную многослойную структуру, его эффективная теплоемкость определяется на основе аддитивной модели смешения фаз C_{ph}

$$C_{ph} = \sum c_i m_i \quad (2)$$

где c_i и m_i - удельная теплоемкость и масса i -го конструкционного элемента ФЭМ соответственно. Для промышленного кремниевого модуля массой 20 кг компонентный баланс и теплофизический вклад слоев представлены в таблице 1.



Таблица 1

Компонентный вклад в эффективную теплоемкость ФЭМ

Конструкционный слой	Материал	Массовая доля, %	c_i , Дж/(кг·К)	Вклад в C_{ph} , Дж/(кг·К)
Лицевая поверхность	Закаленное стекло	65	750	487.5
Опорный каркас	Алюминиевая рама	15	900	135.0
Инкапсуляция	ЭВА-пленка / ПЭТ	10	2300	230.0
Полупроводник	Кремниевые ячейки	5	700	35.0
Задняя подложка	Пластик (Tedlar)	5	1200	60.0
ИТОГО	Модуль в сборе	100%		947.5

Процесс изменения теплового состояния системы описывается уравнением нестационарного теплообмена [8,9]:

$$\sum_{i=1}^{N=5} m_i c_i \frac{dT}{dt} = P(T) - Q_s(t) - Q_a(t) \quad (3)$$

где $P(T)$ - мощность электрического нагрева (Вт), $Q_s(t)$ - тепловой поток в слой снега (Вт), $Q_a(t)$ - потери тепла в окружающую среду через тыльную сторону модуля (Вт).

Для повышения точности прогнозирования в модель введено уравнение динамического изменения подводимой тепловой мощности. При фиксации выходного тока внешнего источника выделяемая мощность ($P(T)$) определяется линейной температурной зависимостью сопротивления кремниевых элементов:

$$P(T) = P_0 \cdot (1 + \beta \cdot (T - T_s)) \quad (4)$$

где P_0 - номинальная мощность тепловыделения при опорной температуре T_s (Вт); β - температурный коэффициент сопротивления (ТКС) кремниевой структуры (K^{-1}). ТКС кремния имеет отрицательное значение $\beta < 0$. По мере прогрева ФЭМ от начальной зимней температуры T_s до точки фазового перехода $0^\circ C$, его внутреннее сопротивление и мгновенная мощность нагрева $P(T)$ монотонно убывают. Это ограничивает приток энергии на этапе плавления по сравнению со статическими моделями.

Потери тепла с тыльной стороны учитывают конвекцию и радиационное излучение в окружающую среду [8,9]:

$$Q_a(t) = \alpha_a \cdot A \cdot (T - T_s) \quad (5)$$

где α_a - комплексный коэффициент теплоотдачи тыльной стороны, A - площадь модуля.

Плотность теплового потока, уходящего в снежный покров через лицевое стекло, до момента начала плавления определяется уравнением теплопроводности в допущении, что внешняя кромка снега имеет температуру воздуха T_s :

$$Q_s(t) = \frac{\lambda_s}{h_s} \cdot A \cdot (T - T_s) \quad (6)$$

где λ_s - коэффициент теплопроводности снега, являющийся функцией его плотности.

При достижении интерфейсом «стекло - снег» температуры $T = 0$ активируется уравнение фазового превращения. Температура ФЭМ стабилизируется, а вся подводимая энергия за вычетом внешних потерь уходит на преодоление скрытой теплоты плавления льда [8,9,10]:

$$Q_{mel} = L \frac{dm_a}{dt} \quad (7)$$

где $L = 334 \cdot 10^3$ Дж/кг - удельная теплота плавления льда, m_a - масса растаявшего пограничного слоя.



Снежная масса удерживается на наклонном модуле силой трения покоя. Условие срагивания нсезного пласта под действием скатывающей составляющей силы тяжести имеет вид $tg\Theta \geq \mu(t)$. Динамика коэффициента трения $\mu(t)$ описывается ступенчатой функцией и зависит от наличия жидкой фазы на контактной поверхности:

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_d = 0.6, & T < 0^\circ\text{C} \\ \mu_w = 0.005, & T > 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

Как только на границе сред образуется непрерывная водяная пленка заданной критической массы m_c , коэффициент трения скачком падает до 0.005 (гидродинамическое трение по водяному клину), условие $tg\Theta \geq \mu(t)$ выполняется, и пласт лавинообразно соскальзывает под действием силы тяжести.

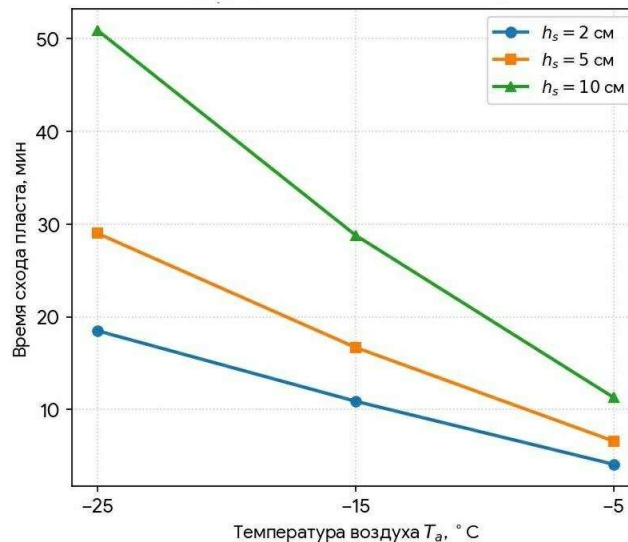


Рис. 1. Время схода (очистки) снежного покрова ФЭМ.

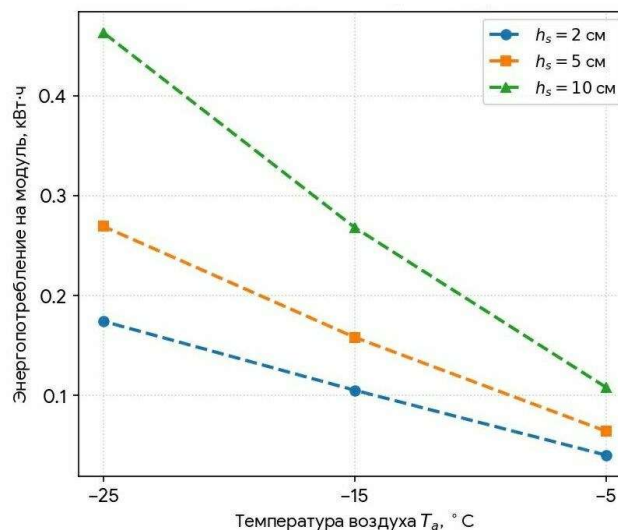


Рис. 2. Суммарные энергозатраты на очистку ФЭМ.

Результаты численного моделирования и их обсуждение

На рисунках 1 и 2 представлены результаты численного исследования динамики очистки фотоэлектрического модуля (ФЭМ) от снежного покрова при фиксированной номинальной мощности джоулевого нагрева $P_0 = 600$ Вт и варьировании температуры наружного воздуха T_s от -5°C до -25°C для трех характерных толщин снежного пласта $h_s = 2; 5; 10$ см.

Анализ полученных кривых позволяет выделить следующие ключевые закономерности:



1. С понижением температуры окружающего воздуха время схода пласта t_s и суммарные энергозатраты E_{total} растут по траектории, близкой к экспоненциальной. Так, для слоя снега толщиной 5 см падение температуры от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивает время очистки на 10.1 мин, в то время как дальнейшее охлаждение до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к задержке схода еще на 12.3 мин. Данный изгиб кривых наглядно иллюстрирует совместное действие двух физических факторов: интенсификации внешних тепловых потерь в окружающую среду Q_a и монотонного падения мгновенной тепловой мощности $P(T)$ полупроводниковой структуры из-за отрицательного температурного коэффициента сопротивления кремния.

2. При умеренно отрицательных температурах $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ разница во времени схода между тонким (2 см) и толстым (10 см) слоями минимальна и составляет всего 7.2 мин. Это подтверждает, что на этапе сухого прогрева $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ массивный слой снега выступает в роли эффективного теплоизолятора, блокирующего утечку тепла через лицевое стекло ФЭМ. Однако при сильном морозе $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ теплоотвод в снежную массу начинает превалировать, увеличивая разрыв во времени схода между указанными слоями до 32.4 мин.

3. Точка, соответствующая параметрам $T_s = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $h_s = 10\text{ см}$, ($t_s = 50.9\text{ мин}$, $E_{total} = 0.463\text{ кВт}\cdot\text{ч}$) является граничной для исследуемой конфигурации системы. Дальнейшее усложнение метеоусловий при заданной мощности P_0 ведет к асимптотическому приближению правых частей уравнений теплового баланса к нулю, что физически означает стабилизацию системы при отрицательных температурах и невозможность генерации критической массы талой воды m_c для схода пласта.

Заключение

В настоящей работе разработана и верифицирована усовершенствованная математическая модель нестационарного теплового баланса и механических условий срагивания снежного покрова с поверхности фотоэлектрического модуля методом обратного токового нагрева. В отличие от существующих статических подходов, в модели впервые строго учтена температурная зависимость мощности тепловыделения $P(T)$, обусловленная отрицательным ТКС кремниевых полупроводниковых структур при питании от источника постоянного тока. На основе проведенных вычислительных экспериментов сформулированы следующие выводы:

1. Доказано, что пренебрежение температурной зависимостью сопротивления кремния ведет к занижению расчетного времени очистки на 1.5 – 2.5 % в критических режимах из-за падения реальной мощности нагрева ФЭМ в среднем на 2 – 3 % к моменту начала фазового перехода.

2. Установлены аналитические границы применимости метода: при мощности нагрева 300 Вт/м^2 ($P_0 = 600\text{ Вт}$) система сохраняет высокую эффективность (время схода до 30 мин) вплоть до температур воздуха $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ при любой толщине снега до 10 см. При экстремальных морозах $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ очистка протяженных пластов толщиной более 10 см требует принудительного форсирования стартовой мощности источника питания.

3. Определены удельные энергетические показатели снегоочистки, варьирующиеся от $0.020\text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$ (для легкого снега при $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0.231\text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$ (для плотного слоя при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет осуществлять предиктивное планирование энергопотребления собственных нужд солнечных электростанций в зимний период.

В качестве перспектив дальнейшего развития модели авторами планируется переход от сосредоточенной теплоемкости к многомерной сетке для учета краевых эффектов алюминиевой рамы ФЭМ, а также интеграция уравнений динамического уплотнения и изменения теплопроводности снежного массива по мере его насыщения жидкой фазой.

Список литературы

- [1]. Granlund A., Lindh M., Vikberg T., Petersson A. M. Evaluation of snow removal methods for rooftop photovoltaics // 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. -2022. - P. 1122-1128.



- [2]. Weiss A., Weiss H. Photovoltaic Cell Electrical Heating System for Removing Snow on Panel Including Verification // International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). - 2016. - P. 995-1000.
- [3]. Rahmatmand A., Harrison S. J., Oosthuizen P. H. An experimental investigation of snow removal from photovoltaic solar panels by electrical heating // Solar Energy. - 2018. - Vol. 171. - P. 811-826.
- [4]. Cai Y., Wang Z., Li J., Jiang X., Chen Y., Zhang X., Kan W. Research on the Electro-Thermal Characteristics of Photovoltaic Modules and Array MPPT Under Partial Shading and Complex Operating Conditions // Sustainability. - 2026. - Vol. 18. - Art. 7016.
- [5]. Elakkad S., Hesham M., Bastawrous H. A., Makeen P. Design, Control, and Evaluation of a Photovoltaic Snow Removal Strategy Based on a Bidirectional DC-DC Converter for Photovoltaic–Electric Vehicle Application // Energies. - 2024. - Vol. 17. -Art. 6468.
- [6]. Kılıç A., Kılıç H. N., Öncü S., Kıvrak S. Experimental implementation of reverse-current-based snow removal for high-voltage series-connected PV arrays using a grid-fed boost converter // ESTIJ. - 2026. - Vol. 76. - Art. 102314.
- [7]. Forsyth G. E., Malcolm M. A., Moler C. B. Computer Methods for Mathematical Computations. - Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1977.
- [8]. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебник для вузов. - 4-е изд. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.
- [9]. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. - 488 с.
- [10]. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 784 с.