

УДК 621.317

Система автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного кабеля

Б. А. Соловьев, Г. К. Гамисония, А. Д. Аюпов, Р. Т. Хазиева

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1

Для цитирования: Соловьев Б. А., Гамисония Г. К., Аюпов А. Д., Хазиева Р. Т. Система автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного кабеля // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 2. С. 187–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-187-205

Аннотация

Цель: разработка подхода к автоматическому управлению энергопотреблением электрических систем подогрева тротуаров на основе резистивного греющего кабеля, обеспечивающего минимизацию расхода электроэнергии при сохранении требуемого уровня противогололедной защиты. **Методы:** выполнены обзор и классификация существующих принципов управления системами снеготаяния: от простейших термостатов по температуре воздуха до комбинированных систем с датчиками температуры поверхности, влажности и погодозависимыми алгоритмами. Для сравнительного анализа эффективности различных стратегий управления использована упрощенная теплотехническая модель подогреваемой плиты, реализованная методом численного интегрирования (метод Эйлера) с шагом дискретизации 5 мин. Оценка энергопотребления выполнена на основе уравнения теплового баланса, учитывающего подводимую мощность, теплопотери и затраты на фазовый переход. **Результаты:** предложена структурная схема системы автоматического управления, включающая силовую часть, измерительные компоненты (датчики температуры воздуха, поверхности и влажности) и микропроцессорный контроллер с возможностью реализации логических и ПИД-алгоритмов. На основе имитационного моделирования суточной работы системы установлено, что переход от простейшего управления по температуре воздуха к управлению по температуре поверхности позволяет сократить энергопотребление на 35 %, а применение комбинированного алгоритма с учетом наличия влаги/осадков — на 60 % (с 2,5 до 1,0 кВт·ч/м²). Показано, что интеграция прогнозных данных и зональное ограничение мощности создают дополнительный потенциал энергосбережения. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих систем электрического подогрева тротуаров, входных групп, пандусов и других объектов городской инфраструктуры. Предложенные алгоритмы и архитектура системы позволяют обоснованно выбирать стратегию управления, обеспечивающую значительное снижение эксплуатационных затрат на электроэнергию без ухудшения условий безопасности пешеходов.

Ключевые слова: подогрев тротуара, резистивный кабель, энергопотребление, снеготаяние, датчик влажности, температурный датчик

Введение

В условиях климатических зон с устойчивыми отрицательными температурами в зимний период обеспечение безопасных условий передвижения пешеходов по тротуарам и пандусам является важной инженерной задачей. Обледенение и уплотненный снег приводят к увеличению травматизма, повышенным затратам на механическую уборку и применение реагентов, а также к ускоренному разрушению покрытий. Одним из эффективных способов решения проблемы является

использование систем электрического подогрева тротуаров на основе резистивных кабелей или нагревательных матов.

Практика эксплуатации показывает, что при неправильном выборе стратегии управления такие системы могут обладать крайне высоким энергопотреблением, сопоставимым с нагрузкой системы электроснабжения здания. В то же время коммерческие решения для подогрева подъездных путей и тротуаров, позиционируемые как энергоэффективные, практически всегда используют автоматическое управление, основанное на датчиках температуры и наличия влаги/осадков, а также на достаточно гибких алгоритмах включения и задержки отключения [1, 2].

Целями настоящего исследования являются анализ существующих принципов автоматического управления электрическими системами подогрева тротуаров и разработка структурной схемы системы управления энергопотреблением подогреваемого тротуара на основе резистивного греющего кабеля, обеспечивающей требуемый уровень противогололедной защиты при минимальном расходе электроэнергии.

Научная значимость исследования заключается в формализации и сравнительном анализе различных алгоритмов управления системами снеготаяния на основе упрощенной теплотехнической модели подогреваемого тротуара, а также в количественной оценке энергетического эффекта от применения комбинированных и прогнозных алгоритмов управления.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при проектировании и модернизации систем электрического подогрева тротуаров и пешеходных зон, а также при выборе алгоритмов автоматического управления, позволяющих существенно снизить энергопотребление без ухудшения условий безопасности движения. Для достижения цели решаются следующие задачи:

- выполнить обзор конструктивных особенностей систем подогрева тротуара на основе резистивного кабеля и установить характерные диапазоны удельной мощности;
- классифицировать применяемые в практике способы управления мощностью систем снеготаяния;
- сформировать упрощенную математическую модель теплового режима подогреваемого тротуара;
- предложить алгоритм автоматического управления, ориентированный на снижение энергопотребления;
- оценить ожидаемую экономию энергии при переходе от простейших систем управления к комбинированным.

Анализ публикаций по теме показывает, что термоэлектрические генераторы (ТЭГ), работающие на основе эффекта Зеебека, на протяжении последних десятилетий активно исследуются как средство прямого преобразования тепловой

энергии в электрическую. Основное внимание в научных работах уделяется утилизации сбросового тепла промышленных установок, транспортных систем и объектов инфраструктуры, где тепловая энергия в противном случае теряется без полезного использования [3, 4]. В ряде обзорных работ показано, что ключевыми преимуществами термоэлектрических систем являются отсутствие движущихся частей, высокая надежность и возможность длительной автономной эксплуатации, тогда как главным ограничением остается низкий коэффициент полезного действия по сравнению с традиционными тепловыми машинами.

Существенный массив исследований посвящен материалам термоэлектрических элементов и влиянию их свойств на эффективность генерации. Как основной критерий качества используется безразмерный параметр добротности ZT , определяемый соотношением между коэффициентом Зеебека, электрической проводимостью и теплопроводностью материала. Для коммерчески доступных модулей на основе теллурида висмута Bi_2Te_3 , работающих вблизи комнатных температур, характерны значения $ZT \approx 0,8-1,1$, что ограничивает достижимый КПД несколькими процентами. В работах последних лет активно рассматриваются новые классы материалов (скуттерудиты, Half-Heusler-соединения, SnSe , наноструктурированные композиции), для которых сообщается о достижении $ZT > 2$ в лабораторных условиях, однако их промышленное применение пока сдерживается высокой стоимостью, технологической сложностью и проблемами долговременной стабильности.

Отдельное направление исследований связано с инженерными аспектами построения термоэлектрических генераторов и оптимизацией режимов их работы. Показано, что выходная электрическая мощность ТЭГ в значительной степени определяется не только свойствами материала, но и величиной температурного градиента, условиями теплообмена на горячей и холодной сторонах, а также согласованием электрической нагрузки с внутренним сопротивлением генератора [5–7]. В ряде работ подчеркивается, что при недостаточном охлаждении холодной стороны эффективность генерации резко падает даже при наличии источника тепла с достаточно высокой температурой. В связи с этим большое внимание уделяется разработке теплообменников, радиаторов, тепловых труб и других средств интенсификации теплоотвода.

Значительное число публикаций посвящено применению ТЭГ в транспортных системах, прежде всего для рекуперации тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания. Экспериментальные и опытно-промышленные образцы таких систем демонстрируют возможность генерации десятков и сотен ватт электроэнергии, однако при этом доля возвращаемой энергии по отношению к тепловому потоку остается относительно небольшой. Аналогичные подходы рассматриваются для стационарных промышленных источников тепла — печей, котлов, теплообменников и трубопроводов, где термоэлектрические модули

интегрируются в существующие конструкции без существенного вмешательства в технологический процесс.

В последние годы возрастает интерес к использованию термоэлектрических генераторов в системах распределенной и вторичной энергетики, а также в концепции энергосбора (energy harvesting) для питания маломощных электронных устройств и датчиков интернета вещей. В научных работах показано, что даже при малых температурных перепадах (5–30 °C) ТЭГ способны обеспечивать энергией автономные сенсорные узлы, микроконтроллеры и системы беспроводной передачи данных при условии крайне низкого энергопотребления нагрузки. Особенно перспективными считаются приложения в интеллектуальной инфраструктуре — зданиях, инженерных сетях и городских объектах, где температурные градиенты присутствуют постоянно, но традиционно не используются для генерации энергии.

При этом анализ литературы показывает, что большинство исследований либо сосредоточено на высокотемпературных источниках тепла, либо ограничивается теоретическими оценками и модельными экспериментами. Работы, посвященные экспериментальной оценке выходной мощности коммерческих модулей Пельтье в условиях низкопотенциального тепла, встречаются значительно реже и часто не содержат детального сопоставления теоретических и экспериментальных результатов. Кроме того, недостаточно освещены вопросы практической реализуемости таких систем в элементах городской инфраструктуры, где важную роль играют надежность, простота конструкции и возможность интеграции без значительного удорожания объекта.

Материалы и методы

Конструкция и принцип действия

Электрические системы подогрева тротуаров относятся к поверхностным системам противогололедной защиты. Основным элементом является резистивный греющий кабель (постоянной или саморегулирующейся мощности), укладываемый в тело конструкции — бетонную плиту, слой асфальтобетона или песчано-цементную подушку под тротуарной плиткой. Сверху формируется рабочее покрытие (бетон, асфальт, плитка), обеспечивающее механическую прочность и защиту кабеля. Характерный диапазон удельной установленной мощности для противогололедных систем составляет 200–400 Вт/м² в умеренном климате и может достигать 300–500 Вт/м² в более суровых условиях. При пониженных наружных температурах (ниже –15 °C) и интенсивных снегопадах целесообразно проектировать системы с удельной мощностью не менее 250–300 Вт/м². Поверхностная температура тротуара T_s определяется балансом между тепловой мощностью, выделяемой кабелем, теплопотерями в окружающую среду и затратами тепла на плавление снега и льда [8–9]. Энергия, подведенная к кабелю, в конечном счете расходуется:

- на нагрев конструкций (бетонной плиты, основания);
- теплопередачу в окружающий воздух (конвекция, излучение);
- фазовый переход льда в воду.

Таким образом, эффективное управление энергопотреблением требует учета как внешних климатических условий, так и тепловых характеристик конструкции.

Режимы работы и критерии эффективности

С точки зрения пользователя основными критериями эффективности системы подогрева являются:

- отсутствие льда и опасного снежного наката на поверхности тротуара;
- минимальное энергопотребление при обеспечении заданного уровня безопасности;
- высокая автоматизация работы (минимум ручных вмешательств).

Надежность работы системы определяется тем, насколько устойчиво обеспечивается выполнение целевого условия: $T_s \geq T_{\min}$ (обычно $T_{\min} \approx 1-3$ °С) при наличии осадков в виде снега и/или при оттепелях, когда возможно образование гололеда. Периоды, когда поверхность сухая и температура воздуха выше нуля, должны сопровождаться полным отключением системы для снижения затрат электроэнергии.

Способы управления системами подогрева тротуаров

Ручное и простейшее термостатное управление

Исторически первые системы подогрева тротуаров функционировали по принципу ручного включения: пользователь просто включал цепь питания кабеля при наступлении морозов и выключал ее при улучшении погоды. Подобная схема проста, но крайне неэффективна — система нередко работает «на всякий случай» даже при отсутствии осадков. Следующим шагом развития стало применение простых термостатов, реагирующих только на температуру наружного воздуха T_a . Управляющий закон в этом случае можно описать двухпозиционной логикой:

если $T_a \leq T_{\text{он}}$, то $u = 1$;

если $T_a \geq T_{\text{оф}}$, то $u = 0$,

где u — управляющее воздействие (0 — выключено, 1 — включено);

$T_{\text{он}}$ и $T_{\text{оф}}$ — пороги включения и отключения соответственно.

Несмотря на определенное улучшение энергетической эффективности по сравнению с полностью ручным управлением, подобные системы имеют существенный недостаток: они не учитывают наличие или отсутствие осадков и состояние поверхности. При отрицательной температуре воздуха, но сухой поверхности подогрев остается включенным, что приводит к излишнему расходу энергии [10–12].

Управление по температуре поверхности

Для более точного поддержания теплового режима в практике широко применяются датчики температуры поверхности или датчики, размещенные в толще плиты на определенной глубине. Контроллер, ориентируясь на температуру T_s , стремится удерживать ее в заданном диапазоне:

$$T_{\min} \leq T_s \leq T_{\max}.$$

Двухпозиционный закон управления можно записать в виде:

если $T_s \leq T_{\min}$, то $u = 1$;

если $T_s \geq T_{\max}$, то $u = 0$.

При этом датчик воздуха T_a чаще используется как ограничитель (например, блокировка системы при температурах выше $+3 \dots +5$ °С). Подобная схема управления более энергоэффективна, так как учитывает тепловую инерцию конструкции и предотвращает перегрев поверхности, однако по-прежнему не различает сухую и влажную поверхность.

Комбинированное управление по температуре и наличию влаги

Наиболее распространенным решением для систем снеготаяния стало применение комбинированных датчиков, измеряющих одновременно температуру и наличие влаги/осадков (снега, воды) на поверхности. Такие датчики устанавливаются заподлицо с покрытием и позволяют отличать сухую и влажную поверхность при отрицательной температуре.

Управляющий алгоритм в этом случае может быть представлен в виде:

если $(T_a \leq T_{\text{crit}} \text{ И } M = 1)$ ИЛИ $(T_s \leq T_{\min})$, то $u = 1$;

если $(M = 0 \text{ И } T_s \geq T_{\max})$, то $u = 0$,

где M — бинарный сигнал датчика влаги (1 — на поверхности есть влага/снег, 0 — поверхность сухая);

T_{crit} — критическая температура воздуха, при которой возможно образование наледи (обычно $0 \dots +2$ °С).

Такой подход обеспечивает включение системы только при сочетании неблагоприятных факторов: отрицательная (или около нулевой) температура и присутствие влаги/осадков [13]. Согласно данным производителей, применение датчиков льда и влаги позволяет снизить энергопотребление до 80% по сравнению с простым управлением по температуре воздуха.

Погодозависимое и прогнозное управление

Дополнительным шагом в сторону повышения энергоэффективности является интеграция системы подогрева тротуаров в общую систему автоматизации здания с использованием погодозависимых алгоритмов. В этом случае контроллер учитывает:

- текущие показания датчиков T_a , T_s и M ;
- краткосрочный прогноз температуры и осадков;
- ограничения по максимальной разрешенной мощности P_{lim} в пиковые часы.

На основе этой информации возможно заранее включать систему (режим преднагрева) перед ожидаемым снегопадом, а также ограничивать мощность при отсутствии необходимости в максимальной интенсивности снеготаяния. Подобные подходы описаны в европейских стандартах, регламентирующих управление электрическими системами отопления и поверхностного подогрева.

Продвинутое алгоритмы: ПИД и нечеткое управление

Для еще более точного соблюдения требуемого температурного режима поверхности могут применяться пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) и нечеткие регуляторы, формирующие непрерывное управляющее воздействие $u(t)$ в виде коэффициента заполнения (скважности) ШИМ-сигнала на контакторе или полупроводниковом реле.

Обобщенно ПИД-закон можно записать в виде:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $e(t) = T_{\text{set}} - T \cdot s(t)$ — ошибка регулирования;

T_{set} — заданная температура поверхности;

K_p , K_i , K_d — коэффициенты ПИД-регулятора.

В системах подогрева тротуаров ПИД-регулятор чаще используется в качестве «надстройки» над двухпозиционной логикой и ограничен диапазоном $0 \leq u(t) \leq 1$, что позволяет реализовывать регулирование мощности путем изменения доли времени включения нагрева в каждом интервале дискретизации. Нечеткие регуляторы строятся на базе набора правил вида «если температура низкая и идет снег, то увеличить мощность», что хорошо согласуется с интуитивной логикой эксплуатации, однако требует предварительной настройки и валидации.

Математическая модель теплового режима подогреваемого тротуара

Упрощенная тепловая схема

Для анализа энергопотребления введем упрощенную модель теплового баланса в одномерной постановке. Будем рассматривать характерный участок тротуара площадью A , содержащий греющий кабель с установленной электрической мощностью P_{el} при включенном состоянии ($u = 1$).

Баланс тепла для слоя толщиной h , характеризуемого эффективной теплоемкостью C_{th} (на единицу площади), можно записать в виде:

$$C_{th} \cdot \frac{dT_s}{dt} = q_h - q_{\text{loss}} - q_{\text{melt}}, \quad (2)$$

где T_s — температура поверхности;

q_h — удельная тепловая мощность, подводимая нагревателем (Вт/м²);

q_{loss} — удельные теплотери в окружающую среду (Вт/м²);

q_{melt} — удельная мощность, расходуемая на плавление снега/льда (Вт/м²).

При включенной системе:

$$q_h = \left(\frac{P_{\text{el}}}{A} \right) u. \quad (3)$$

Теплотери можно приближенно представить как линейную функцию перепада температур между поверхностью и наружным воздухом:

$$q_{\text{loss}} = U \cdot (T_s - T_a), \quad (4)$$

где U — суммарный коэффициент теплопередачи (Вт/(м²·К)), учитывающий конвекцию, излучение и теплопроводность вглубь конструкции.

Мощность на плавление снега задается соотношением:

$$q_{\text{melt}} = \frac{\rho_s \cdot L_f \cdot \Delta h_s}{\Delta t}, \quad (5)$$

где ρ_s — плотность снега (кг/м³);

L_f — удельная теплота плавления льда (Дж/кг);

Δh_s — уменьшение толщины снежного слоя за интервал Δt .

Удельное энергопотребление и время работы

Интегрируя уравнение баланса по времени, можно получить выражение для суммарной энергии, подведенной к системе за эпизод снеготаяния:

$$E_{\text{el}} = \int P_{\text{el}} \cdot u(t) dt. \quad (6)$$

В случае простейшей оценки при постоянной удельной мощности q_h и времени суммарного включения τ_{on} справедлива зависимость:

$$E_{\text{el}} = q_h \cdot A \cdot \tau_{\text{on}}. \quad (7)$$

Тогда удельное энергопотребление на единицу площади за эпизод снеготаяния:

$$e_{\text{sp}} = \frac{E_{\text{el}}}{A} = q_h \cdot \tau_{\text{on}}. \quad (8)$$

Основной резерв экономии энергии связан с сокращением τ_{on} без ухудшения качества снеготаяния. Это достигается за счет более точного определения моментов включения и отключения, использования тепловой инерции конструкции и предотвращения работы «вхолостую» при отсутствии осадков.

Структура системы автоматического управления энергопотреблением

Общая архитектура

На основе проведенного анализа предлагается следующая структурная схема системы автоматического управления подогреваемым тротуаром:

- силовая часть: греющий кабель (или несколько кабельных контуров), силовые контакторы или твердотельные реле;
- измерительная часть: датчик температуры поверхности T_s , датчик наружной температуры T_a , датчик влажности/осадков M , (опционально) датчик температуры в толще конструкции;
- контроллер: микропроцессорный блок с возможностью реализации логических и ПИД-алгоритмов, связи с системой диспетчеризации;
- исполнительные устройства: силовые ключи, сигнальные индикаторы, устройства защиты.

Предлагаемый алгоритм управления

Алгоритм работы можно описать следующей последовательностью:

1. Непрерывное измерение T_a , T_s и M .
2. Оценка климатических условий:
 - если $T_a > T_{\text{block}}$ (например, $+5$ °C), система блокируется ($u = 0$);
 - если $T_a \leq T_{\text{block}}$, разрешается работа по алгоритму снеготаяния.
3. Условие включения (режим активного снеготаяния):
если $(T_a \leq T_{\text{crit}} \text{ И } M = 1)$ ИЛИ $(T_s \leq T_{\text{min}})$, то система переходит в активный режим ($u \rightarrow u_{\text{max}}$).
4. Регулирование мощности в активном режиме:
 - по мере приближения T_s к T_{set} ($2-3$ °C) управляющее воздействие u уменьшается согласно закону ПИД-регулятора, реализуемого через ШИМ;
 - при $T_s \geq T_{\text{max}}$ (например, $4-5$ °C) и $M = 0$ система переходит в режим «догрева» с уменьшенной мощностью ($u = u_{\text{hold}}$).
5. Условие отключения:
 - если в течение интервала τ_{dry} датчик влаги показывает $M = 0$, а $T_s \geq T_{\text{off}}$ (например, $2-3$ °C), система переводится в режим ожидания ($u = 0$).
6. При поступлении информации о прогнозируемом снегопаде (например, из системы «умный дом» или метеослужбы) за время τ_{pre} до начала осадков возможно кратковременное превентивное включение системы (u_{pre}), обеспечивающее предварительный нагрев конструкции и сокращающее время активного снеготаяния.

Лимитирование мощности и зональное управление

В условиях ограниченной мощности электросети возможно введение ограничения P_{lim} на суммарную мощность системы подогрева. В этом случае тротуар

делится на несколько зон, каждая из которых подключается поочередно в соответствии с приоритетами (например, сначала вход в здание и пандус, затем второстепенные участки) [14, 15]. При наличии N зон с удельной мощностью q_h и площадями A_i ($i = 1, \dots, N$) должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^N (u_i \cdot q_h \cdot A_i) \leq P_{\text{lim}}, \quad (9)$$

где u_i — доля времени включения i -й зоны.

Распределение u_i по зонам может выполняться по алгоритму, аналогичному управлению нагрузками в системах управления микросетями, с учетом весовых коэффициентов важности зон.

Результаты

Сравнение режимов управления

Рассмотрим типичный зимний день с несколькими снегопадами суммарной продолжительностью τ_{snow} и отрицательной температурой воздуха $T_a \approx -5 \dots -10$ °С. Для упрощения примем удельную установленную мощность системы $q_h = 250$ Вт/м²:

1. Простейшее управление по температуре воздуха.

При использовании только термостата, срабатывающего при $T_a \leq 0$ °С, система может быть включена в течение всего периода отрицательных температур, например $\tau_{\text{air}} = 10$ ч/сут. Тогда удельное энергопотребление за сутки:

$$e_{\text{air}} = q_h \cdot \tau_{\text{air}} = 250 \cdot 10 = 2500 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 = 2,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

2. Управление по датчику температуры поверхности.

За счет учета тепловой инерции плиты и отключения при достижении $T_s \geq T_{\text{max}}$ время работы сокращается, например, до $\tau_{\text{surf}} = 6-7$ ч. Тогда:

$$e_{\text{surf}} \approx 250 \cdot 6,5 \approx 1625 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 \approx 1,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

Экономия по сравнению с e_{air} составляет около 35%.

3. Комбинированное управление по температуре и влажности.

Если система включается только при наличии осадков и влаги ($M = 1$), а при сухой поверхности отключается, то при суммарной продолжительности снегопадов $\tau_{\text{snow}} = 3$ ч и некотором дополнительном времени догрева $\tau_{\text{afterrun}} = 1$ ч получаем $\tau_{\text{comb}} \approx 4$ ч. Удельное энергопотребление:

$$e_{\text{comb}} = 250 \cdot 4 = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 = 1,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2.$$

В этом случае экономия относительно простого управления по температуре воздуха составляет:

$$S = \frac{e_{\text{air}} - e_{\text{comb}}}{e_{\text{air}}} \cdot 100\% \approx (2,5 - 1,0) / 2,5 \cdot 100\% \approx 60\%. \quad (10)$$

Полученная оценка соответствует данным производителей датчиков льда и влаги, которые указывают возможное снижение энергопотребления до 80% по сравнению с простым воздушным термостатом при правильно настроенной системе.

Влияние прогнозного управления

Дополнительное снижение энергопотребления возможно за счет прогнозного управления, при котором система заранее подогревает плиту перед началом осадков и снижает мощность на стадии стабилизации температуры. Это позволяет уменьшить максимальную требуемую удельную мощность q_h при сохранении качества снеготаяния либо быстрее достигать требуемой температуры T_s при тех же установленных мощностях [16–19]. Количественная оценка эффекта прогнозного управления требует детального моделирования с учетом конкретных метеоусловий, теплофизических свойств конструкции и алгоритмов ограничения мощности, однако уже на качественном уровне очевидно, что объединение информации датчиков и погодного прогноза дает дополнительный потенциал экономии энергии.

Имитационное моделирование суточной работы системы

Для подтверждения аналитических оценок на основе упрощенной модели теплового баланса выполнено имитационное моделирование суточной работы системы подогрева тротуара при различных алгоритмах управления.

В качестве основы использовано уравнение теплового баланса для поверхностного слоя конструкции:

$$C_{th} \cdot \frac{dT_s}{dt} = \dot{q}_h \cdot u(t) - U \cdot (T_s - T_a) - \dot{q}_{melt}(t), \quad (11)$$

где C_{th} — эффективная теплоемкость конструкции на единицу площади (Дж/(м²·К));

T_s — температура поверхности тротуара (°С);

T_a — температура наружного воздуха (°С);

\dot{q}_h — удельная установленная мощность нагревателя (Вт/м²);

$u(t)$ — относительное управляющее воздействие ($0 \leq u \leq 1$);

U — суммарный коэффициент теплопередачи (Вт/(м²·К));

$\dot{q}_{melt}(t)$ — удельная мощность, расходуемая на плавление снега и льда (Вт/м²).

Численное интегрирование уравнения выполнялось методом Эйлера вперед с шагом $\Delta t = 300$ с (5 мин.). В разностной форме модель записывалась как:

$$T_s(k+1) = T_s(k) + A, \quad (12)$$

$$A = \left(\frac{\Delta t}{C_{th}} \right) \cdot (\dot{q}_h \cdot u(k) - U \cdot (T_s(k) - T_a(k)) - \dot{q}_{melt}(k)), \quad (13)$$

где k — номер шага по времени.

Для численной оценки приняты типичные параметры бетонной плиты толщиной $h = 0,10$ м: плотность бетона $\rho = 2400$ кг/м³, удельная теплоемкость $c = 880$ Дж/(кг·К), что дает эффективную теплоемкость:

$$C_{th} = \rho \cdot c \cdot h \approx 2,1 \cdot 10^5 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (14)$$

Суммарный коэффициент теплопередачи выбран $U = 10$ Вт/(м²·К), что отражает совокупное влияние конвекции, теплопроводности вглубь конструкции и излучения. Удельная установленная мощность системы принята $\dot{q}_h = 250$ Вт/м².

Мощность, расходуемая на плавление снега, учитывалась только при наличии осадков ($M = 1$) и отрицательной температуре поверхности ($T_s \leq 0$ °С) и задавалась в виде постоянного потока:

$$\dot{q}_{\text{melt}} = 80 \text{ Вт}/\text{м}^2,$$

что соответствует снегопаду умеренной интенсивности. В сухом режиме ($M = 0$) полагалось $\dot{q}_{\text{melt}} = 0$.

В качестве возмущающих воздействий использован упрощенный суточный профиль температуры наружного воздуха и осадков, имитирующий переходный зимний день: ночное снижение температуры до -8 °С, дневной прогрев до $+1 \dots +2$ °С и два эпизода снегопада общей продолжительностью порядка 3–4 ч при отрицательной температуре. При таком профиле суммарная длительность отрицательных температур $T_a \leq 0$ °С составляет около 10 ч, что соответствует предпосылкам для расчетов.

В рамках моделирования сравнивались три алгоритма управления:

1. *Простой термостат по температуре воздуха.*

Нагрев включается при $T_a \leq 0$ °С и выключается при $T_a > 0$ °С:

если $T_a \leq 0$ °С, то $u = 1$;

если $T_a > 0$ °С, то $u = 0$.

2. *Управление по температуре поверхности.*

Используется гистерезис по T_s с порогами $T_{\min} = 0$ °С и $T_{\max} = 3$ °С:

если $T_s \leq T_{\min}$, то $u = 1$;

если $T_s \geq T_{\max}$, то $u = 0$.

В интервале $T_{\min} < T_s < T_{\max}$ режим определяется предысторией (характерный «релейный» регулятор).

3. *Комбинированное управление по температуре и наличию влаги.*

Алгоритм соответствует логике ручного термостатного управления с выбором порогов $T_{\text{crit}} = 0$ °С, $T_{\min} = 0$ °С, $T_{\max} = 3$ °С и учетом небольшого времени догрева $\tau_{\text{afterun}} \approx 1$ ч после окончания снегопада:

если ($T_a \leq T_{\text{crit}}$ И $M = 1$) ИЛИ ($T_s \leq T_{\min}$), то $u = 1$;

если ($M = 0$ И $T_s \geq T_{\max}$), то $u = 0$.

Таким образом, при комбинированном управлении нагрев включен только при наличии осадков и/или при охлаждении поверхности до окрестности точки таяния, а при сухой теплой поверхности ($M = 0, T_s \geq T_{\max}$) система переходит в режим ожидания.

Для каждого алгоритма по результатам моделирования рассчитывались суточная длительность работы нагревателя:

$$\tau_{\text{on}} = \sum (k = 1 \rightarrow N) (u(k) \cdot \Delta t) \quad (15)$$

и удельное энергопотребление за сутки:

$$e_{\text{sp}} = \dot{q}_h \cdot \tau_{\text{on}}, \quad (16)$$

что согласуется с аналитическим выражением $e_{\text{sp}} = \dot{q}_h \cdot \tau_{\text{on}}$, приведенным ранее.

Полученные результаты показывают, что при простом управлении по температуре воздуха нагреватель включен практически на весь период отрицательных температур ($\tau_{\text{air}} \approx 10$ ч/сут.), при этом температура поверхности T_s в отсутствие снега достигает 8–12 °С, то есть существенно выше точки таяния. Соответствующее удельное энергопотребление составляет порядка $e_{\text{air}} \approx 2,5$ кВт·ч/м², что совпадает с оценкой.

При управлении по датчику температуры поверхности длительность работы системы уменьшается до $\tau_{\text{surf}} \approx 6-7$ ч/сут. Температура T_s большую часть времени удерживается в диапазоне 0...+3 °С, а перегрев поверхности существенно сокращается. Расчет дает удельное энергопотребление $e_{\text{surf}} \approx 1,6$ кВт·ч/м², то есть экономия по сравнению с простым термостатом по воздуху составляет порядка 35% [20, 21].

Комбинированный алгоритм, учитывающий наличие влаги на поверхности, позволяет еще сильнее уменьшить τ_{on} . Нагрев включен только во время снегопадов и короткого догрева после их окончания, поэтому суммарная длительность активного режима уменьшается до $\tau_{\text{comb}} \approx 4$ ч/сут. Соответствующее удельное энергопотребление составляет $e_{\text{comb}} \approx 1,0$ кВт·ч/м², а суммарная экономия относительно простого управления по температуре воздуха достигает:

$$S = \frac{e_{\text{air}} - e_{\text{comb}}}{e_{\text{air}}} \cdot 100 \% \approx 60 \%. \quad (17)$$

Результаты моделирования практически совпадают с оценками и дополнительно показывают, что при комбинированном управлении условия $M = 1$ и $T_s < 0$ °С возникают лишь кратковременно в начале эпизода снегопада [22]. Это обеспечивает приемлемый уровень безопасности движения при заметном снижении энергопотребления.

Обсуждение

Для наглядного представления результатов моделирования на рис. 1 показаны суточные зависимости $T_a(t)$, $T_s(t)$ и управляющего воздействия $u(t)$ для трех рассмотренных алгоритмов управления. Видно, что при простом термостате по температуре воздуха $u(t)$ остается активным практически на весь интервал отрицательных температур, тогда как при управлении по поверхности и комбинированном алгоритме интервалы работы нагревателя существенно сокращаются.

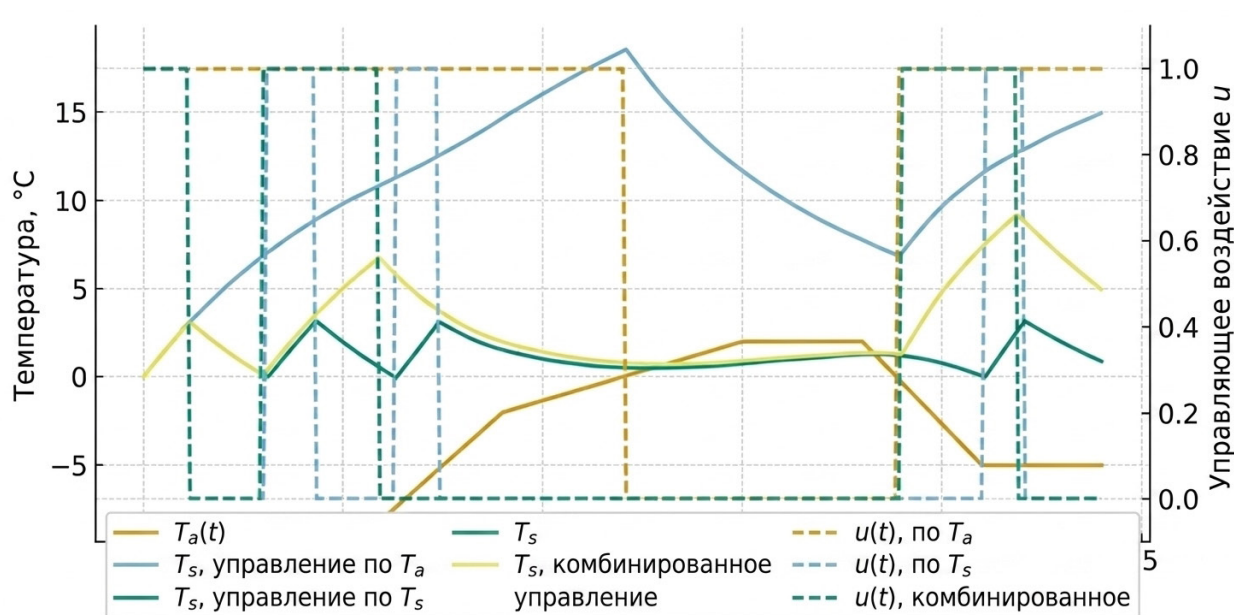


Рис. 1. Суточные зависимости температуры воздуха $T_a(t)$, температуры поверхности тротуара $T_s(t)$ и управляющего воздействия $u(t)$ при различных алгоритмах управления подогревом

На рис. 2 приведено сравнение удельного суточного энергопотребления e_{air} , e_{surf} и e_{comb} в виде столбчатой диаграммы. График наглядно демонстрирует снижение энергозатрат при переходе от простого управления по температуре воздуха к комбинированному алгоритму более чем в 1,5–2 раза, что подтверждает целесообразность применения предложенной структуры системы автоматического управления энергопотреблением подогреваемого тротуара.

Такие графики позволяют визуально продемонстрировать сокращение времени работы системы и снижение перегрева поверхности при переходе от простого термостата к комбинированному алгоритму, что подтверждает эффективность предложенной структуры системы автоматического управления энергопотреблением.

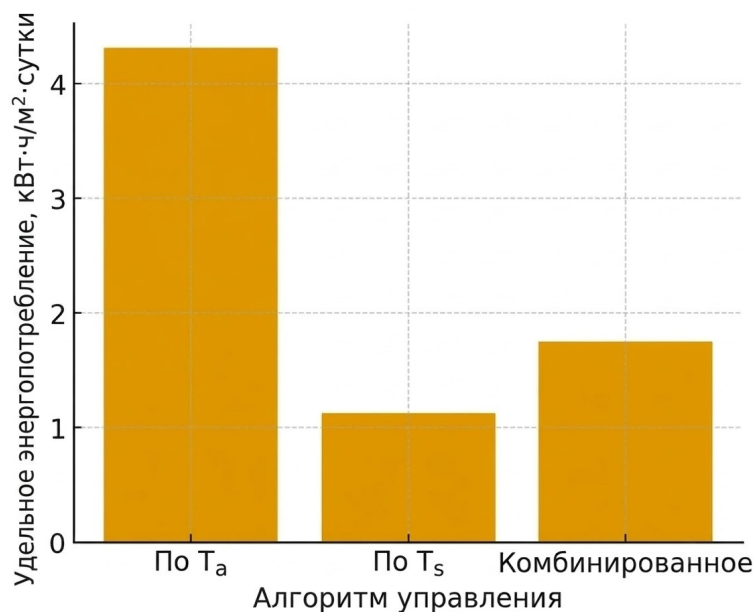


Рис. 2. Удельное суточное энергопотребление e_{air} , e_{surf} , e_{comb} для различных алгоритмов управления подогревом тротуара

Заключение

В работе проведен анализ существующих способов управления системами электрического подогрева тротуаров на основе резистивного кабеля и предложена структурная схема системы автоматического управления энергопотреблением. Показано, что традиционное управление только по температуре наружного воздуха приводит к значительным избыточным затратам электроэнергии вследствие работы системы при сухой поверхности и благоприятных условиях. Переход к управлению по температуре поверхности позволяет учесть тепловую инерцию конструкции и уменьшить время работы нагревателей. Наибольший эффект дает комбинированное управление по температуре и наличию влаги/осадков, при котором система включается только при реальной необходимости снеготаяния и автоматически отключается после устранения снега и льда.

На основе упрощенной теплотехнической модели подогреваемой плиты показано, что применение комбинированных датчиков и соответствующих алгоритмов управления позволяет снизить удельное энергопотребление системы до 50–60% и более по сравнению с простым управлением по температуре воздуха, что согласуется с данными производителей коммерческих систем снеготаяния. Дополнительный потенциал экономии энергии связан с внедрением прогнозного управления на основе метеоданных и ограничением мощности за счет зонального подключения нагрузок. Предложенная архитектура и алгоритмы управления могут быть использованы при проектировании новых систем подогрева тротуаров, а также при модернизации существующих установок, где до настоящего времени применялось только ручное или простое термостатное управление.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Повышение энергоэффективности распределенных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, №4. С. 15–25.
2. Лаптев А.Г., Шарафутдинов Р.А. Интеллектуальные системы управления электропотреблением зданий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, №3. С. 42–52.
3. Фарахов Т.М., Сафиуллин Р.Н. Гибкие алгоритмы управления нагрузками в интеллектуальных энергосистемах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, №2. С. 60–69.
4. Лаптев А.Г., Габдрахманов Н.Ф. Повышение энергетической эффективности инженерных систем зданий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. №2. С. 33–41.
5. Фарахов Т.М., Хасанова Э.Р. Автоматизированные системы управления энергопотреблением // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. №4. С. 58–66.
6. Соловьев Б.А., Хазиева Р.Т., Гамисония Г.К. Генерация энергии на основе эффекта Зеебека с использованием модулей Пельтье // Электротехнические системы и комплексы. 2023. №2. С. 44–52.
7. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические источники питания для электронной аппаратуры // Компоненты и технологии. 2016. №1. С. 90–95.
8. Иванов М.А., Соловьев Б.А. Термоэлектрические генераторы в системах рекуперации тепла // Энергосбережение. 2022. №6. С. 38–45.
9. Аюпов А.Д., Соловьев Б.А. Анализ эффективности систем утилизации низкопотенциального тепла // Электрические станции. 2021. №9. С. 31–38.
10. Хазиева Р.Т., Соловьев Б.А. Автономное электропитание датчиков на основе термоэлектрических генераторов // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. №5. С. 22–28.
11. Гамисония Г.К., Соловьев Б.А. Энергосбор в интеллектуальной городской инфраструктуре // Городское хозяйство и экология. 2019. №3. С. 14–21.
12. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2018.
13. ГОСТ Р 54852-2011. Системы электрического обогрева поверхностей.
14. Шостаковский П.Г. Термоэлектрические генераторы промышленного применения // Современная электроника. 2015. №1. С. 2–8.
15. A Comprehensive Review of Thermoelectric Generators / N. Jaziri [et al.] // Energy Reports. 2020. Vol. 6. Pp. 264–287.
16. Lund H., Østergaard P.A. Smart Energy Systems and Flexibility // Energy. 2020. Vol. 195. Art. 116982.
17. Li Y., Wu J., Zhang X. Energy-Efficient Control of Electric Heating Systems // Applied Energy. 2021. Vol. 285. Art. 116402.
18. Pfeiffelmann B., Benim A. C., Joos F. Water-Cooled Thermoelectric Generators // Energies. 2021. Vol. 14, no. 24. Art. 8329.

19. Kim J., Park S. Adaptive Control Strategies for Snow-Melting Systems // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 214. Art. 118876.
20. Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery / M. Saha [et al.] // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 59. Art. 103394.
21. Goldsmid H.J. Thermoelectric Refrigeration and Power Generation. London: Taylor & Francis, 2017.
22. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex Thermoelectric Materials // *Nature Materials*. 2008. Vol. 7. Pp. 105–114.

Дата поступления: 30.03.2026

Решение о публикации: 24.05.2026

Контактная информация:

СОЛОВЬЕВ Богдан Алексеевич — ассистент; SolovevBA@mail.ru

ГАМИСОНИЯ Гиорги Кахаберович — аспирант; giorgi111@gmail.com

АЮПОВ Арслан Динарович — студент; arslanaupov31@gmail.com

ХАЗИЕВА Регина Тагировна — кандидат техн. наук, доцент; KhazievaRT@mail.ru

Automatic Energy Consumption Control System for Heated Sidewalks Based on Resistive Cables

B. A. Solov'ev, G. K. Gamisonia, A. D. Ayupov, R. T. Khazieva

Ufa State Petroleum Technical University, 1 Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russia

For citation: *Solov'ev B. A., Gamisonia G. K., Ayupov A. D., Khazieva R. T. Automatic Energy Consumption Control System for Heated Sidewalks Based on Resistive Cables // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 2, pp. 187–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-2-187-205 (In Russian)*

Abstract

Purpose: development of an approach to automatic power consumption control for electric sidewalk heating systems based on resistive heating cables, ensuring minimal electricity consumption while maintaining the required level of anti-icing protection. **Methods:** a review and classification of existing control principles for snow melting systems is performed, ranging from simple air temperature thermostats to combined systems with surface temperature sensors, humidity sensors, and weather-dependent algorithms. For a comparative analysis of the effectiveness of various control strategies, a simplified thermal model of a heated slab is used, implemented using the numerical integration method (Euler's method) with a discretization step of 5 minutes. Energy consumption assessment is carried out based on the heat balance equation, taking into account the supplied power, heat losses, and the energy required for phase transition. **Results:** a block diagram of the automatic control system is proposed, including a power section, measuring components (air temperature, surface temperature, and humidity sensors), and a microprocessor controller capable of implementing logic and PID algorithms. Based on simulation of the system's daily operation, it is established that switching from simple air temperature control to surface temperature control reduces energy consumption by 35 %, while applying a combined algorithm that accounts for the presence of moisture/precipitation reduces it by 60 % (from 2.5 to 1.0 kWh/m²). It is shown that the integration of forecast data and zonal power limiting creates

additional energy saving potential. **Practical importance:** the obtained results can be used in the design of new and modernization of existing electric heating systems for sidewalks, entrance areas, ramps, and other urban infrastructure facilities. The proposed algorithms and system architecture allow for a well-founded choice of control strategy, ensuring a significant reduction in operational electricity costs without compromising pedestrian safety conditions.

Keywords: electric sidewalk heating, resistive heating cable, snowmelt, automatic control, power consumption, humidity sensor, temperature sensor

References

1. Farakhov T. M., Laptev A. G. Povyshenie energoeffektivnosti raspredelennykh sistem elektrosnabzheniya [Improving the Energy Efficiency of Distributed Power Supply Systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems]*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 15–25. (In Russian)
2. Laptev A. G., Sharafutdinov R. A. Intellectual'nye sistemy upravleniya elektropotrebleniyem zdaniy [Intelligent Power Management Systems for Buildings], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems]*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 42–52. (In Russian)
3. Farakhov T. M., Safiullin R. N. Gibkie algoritmy upravleniya nagruzkami v intellektual'nykh energosistemakh [Flexible Load Management Algorithms in Intelligent Power Systems], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems]*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 60–69. (In Russian)
4. Laptev A. G., Gabdrakhmanov N. F. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti inzhenernykh sistem zdaniy [Improving the Energy Efficiency of Building Engineering Systems], *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Kazan State Power Engineering University]*, 2021, no. 2, pp. 33–41. (In Russian)
5. Farakhov T. M., Khasanova E. R. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya energopotrebleniyem [Automated Energy Management Systems], *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Kazan State Power Engineering University]*, 2020, no. 4, pp. 58–66. (In Russian)
6. Solov'ev B. A., Khazieva R. T., Gamisonia G. K. Generatsiya energii na osnove effekta Zeebeka s ispol'zovaniem modulej Pel't'e [Energy Generation Based on the Seebeck Effect Using Peltier Modules], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes]*, 2023, no. 2, pp. 44–52. (In Russian)
7. Shostakovskij P. G. Termoelektricheskie istochniki pitaniya dlya elektronnoj apparatury [Thermoelectric Power Supplies for Electronic Equipment], *Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]*, 2016, no. 1, pp. 90–95. (In Russian)
8. Ivanov M. A., Solov'ev B. A. Termoelektricheskie generatory v sistemakh rekuperatsii tepla [Thermoelectric Generators in Heat Recovery Systems], *Energoberezhenie [Energy Saving]*, 2022, no. 6, pp. 38–45. (In Russian)
9. Ayupov A. D., Solov'ev B. A. Analiz effektivnosti sistem utilizatsii nizkopotentsial'nogo tepla [Efficiency Analysis of Low-Potential Heat Recovery Systems], *Elektricheskie stantsii [Electric Stations]*, 2021, no. 9, pp. 31–38. (In Russian)

10. Khazieva R. T., Solov'ev B. A. Avtonomnoe elektropitanie datchikov na osnove termoelektricheskikh generatorov [Autonomous Power Supply of Sensors Based on Thermoelectric Generators], *Avtomatizatsiya i IT v energetike [Automation and IT in the Energy Sector]*, 2020, no. 5, pp. 22–28. (In Russian)
11. Gamisonia G. K., Solov'ev B. A. Energosbor v intellektual'noj gorodskoj infrastrukture [Energy Efficiency in Intelligent Urban Infrastructure], *Gorodskoe khozyajstvo i ekologiya [Urban Economy and Ecology]*, 2019, no. 3, pp. 14–21. (In Russian)
12. SNiP 23-01-99*. Stroitel'naya klimatologiya [Building climatology], Moscow, Federal Agency for Construction and Housing and Communal Services Federal Agency for Construction and Housing and Communal Services of Russia, 2018. (In Russian)
13. GOST R 54852-2011. Sistemy elektricheskogo obogreva poverkhnostej [Electric Surface Heating Systems]. (In Russian)
14. Shostakovskij P. G. Termoelektricheskie generatory promyshlennogo primeneniya [Thermoelectric Generators of Industrial Application], *Sovremennaya elektronika [Modern Electronics]*, 2015, no. 1, pp. 2–8. (In Russian)
15. Jaziri N., et al. A Comprehensive Review of Thermoelectric Generators, *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 264–287.
16. Lund H., Østergaard P. A. Smart Energy Systems and Flexibility, *Energy*, 2020, vol. 195, Art. 116982.
17. Li Y., Wu J., Zhang X. Energy-Efficient Control of Electric Heating Systems, *Applied Energy*, 2021, vol. 285, art. 116402.
18. Pfeiffelmann B., Benim A. C., Joos F. Water-Cooled Thermoelectric Generators, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 24, art. 8329.
19. Kim J., Park S. Adaptive Control Strategies for Snow-Melting Systems, *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 214, art. 118876.
20. Saha M., et al. Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023, vol. 59, art. 103394.
21. Goldsmid H. J. Thermoelectric Refrigeration and Power Generation, London, Taylor & Francis, 2017.
22. Snyder G. J., Toberer E. S. Complex Thermoelectric Materials, *Nature Materials*, 2008, vol. 7, pp. 105–114.

Received: March 30, 2026

Accepted: May 24, 2026

Author's information:

Bogdan A. SOLOV'EV — Assistant; SolovevBA@mail.ru

Giorgi K. GAMISONIA — Postgraduate Student; giorgi111@gmail.com

Arslan D. AYUPOV — Student; arslanaupov31@gmail.com

Regina T. KHAZIEVA — PhD in Engineering, Associate Professor; KhazievaRT@mail.ru