

УДК 621.3.027

Имитационная модель асинхронного способа определения толщины льда на контролируемой поверхности

Бараусов Виктор Александрович — исполнительный директор. Научные интересы: интеллектуальные системы обогрева. E-mail: barausovv@gmail.com

Группа Компаний ИМСАТ, Россия, 190031, Санкт-Петербург, ул. Гражданская, д. 7, лит. А

Для цитирования: Бараусов В. А. Имитационная модель асинхронного способа определения толщины льда на контролируемой поверхности // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 20–28. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-20-28

Аннотация. Представлена имитационная модель способа определения толщины льда на контактных проводах железных дорог. Способ основан на асинхронном нагреве двух чувствительных элементов (ЧЭ) с разницей времени включения. Определение толщины льда выполняется на основе анализа длительности фазового перехода льда в воду. **Методы:** построен на классической теории теплопроводности, используемой для построения уравнения теплопередачи. Реализована программная модель в среде MATLAB, проведены расчеты зависимости времени плавления от мощности нагревателей и температуры окружающей среды. Представлены результаты моделирования, научная новизна метода и его практическое применение. **Цель:** разработка имитационной модели способа асинхронного определения толщины льда на поверхности контактных проводов, позволяющей: количественно определять толщину наледи; учитывать влияние внешних факторов (температуры окружающей среды, мощности нагревателей); создать программную реализацию модели и провести ее верификацию на численных экспериментах. **Практическая значимость:** программа позволяет проводить имитационное моделирование работы датчика для обнаружения льда или снега на контролируемой поверхности, что открывает возможности для решения ряда научных и практических задач.

Ключевые слова: имитационная модель, асинхронный способ, определение толщины льда, контактный провод, фазовый переход

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **1.2.1** — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

Актуальность исследования

Разработан способ и устройство определения толщины льда на рабочей поверхности датчика обледенения [1]. Технические решения данного патента могут найти применение при построении мониторинга толщины льда на контактном проводе железных дорог. Обледенение контактных проводов железных дорог представляет серьезную проблему в странах с холодным климатом. Согласно исследованиям [2], наледь на контактных проводах приводит к ухудшению их электропроводности, механическим повреждениям, возникновению электрических дуг,

нарушению стабильности энергоснабжения и обрывам. Существующие методы борьбы с обледенением включают механическую очистку, нагрев проводов и использование химических реагентов. Однако они обладают рядом недостатков: требуют больших энергозатрат, сложны в автоматизации или вызывают экологические проблемы.

В связи с этим разработка новых способов мониторинга и предотвращения обледенения, основанных на точном измерении толщины льда в реальном времени, является актуальной задачей.

Предложенный в патенте [1] способ позволяет оперативно определять степень обледенения, что может значительно повысить эффективность противообледенительных мероприятий, минимизировать энергозатраты и снизить риск повреждения инфраструктуры.

Научные задачи

1. Разработка имитационной модели асинхронного способа определения толщины льда

В статье представлена модель, основанная на классической теории теплопроводности, которая описывает процессы нагрева и фазового перехода льда в воду.

Используются численные методы (метод конечных разностей) для решения уравнений теплопередачи, что позволяет точно моделировать динамику температуры на поверхности датчика.

2. Исследование тепловых процессов и фазовых переходов

Модель позволяет анализировать, как энергия распределяется между нагревом льда, его плавлением и последующим фазовым переходом.

Учитываются такие параметры, как мощность нагревателей, температура окружающей среды и свойства материалов (теплоемкость, теплопроводность).

3. Оптимизация параметров работы датчика

Проведено исследование влияния времени задержки включения второго нагревателя (Δt) и мощности нагрева на характеристики температурных кривых.

Разработаны алгоритмы компенсации внешних воздействий (шум, колебания температуры) для повышения точности измерений.

Практические задачи

1. Создание программной реализации модели

Модель реализована в среде MATLAB, что позволяет проводить имитационное моделирование в различных условиях.

Программный код включает динамическое моделирование температуры чувствительных элементов и анализ влияния метеорологических факторов (тип осадков, температура окружающей среды).

2. Применение в системах мониторинга обледенения

Модель может быть использована для разработки датчиков обледенения на железных дорогах, в авиации и других областях, где важно предотвращать образование льда.

Позволяет тестировать и оптимизировать прототипы датчиков до их внедрения в реальные системы.

3. Поддержка принятия решений

На основе анализа графиков температуры и их разностей модель помогает принимать решения о необходимости активации систем обогрева или других мер по предотвращению обледенения.

Снижает энергозатраты за счет предотвращения ложных срабатываний и оптимизации работы систем.

Описание способа

Способ основан на принципах, описанных в патенте [1]. Он использует два чувствительных элемента (ЧЭ), разнесенных на минимальное расстояние. Первый ЧЭ начинает нагреваться сразу, а второй — с задержкой Δt . Разностная схема измерений фиксирует временной интервал, в течение которого оба датчика находятся при температуре $0\text{ }^\circ\text{C}$ (фазовый переход льда в воду).

Формула расчета толщины льда

Формула расчета толщины льда построена на тепловом балансе и фазовом переходе (плавлении льда). В ее основе учтены следующие исходные данные (табл. 1) и параметры (табл. 2).

Таблица 1

Исходные данные

Параметр	Значение
Площадь поверхности (S)	0,01 м ²
Плотность льда (ρ)	917 кг/м ³
Удельная теплота плавления (λ)	$335 \cdot 10^3$ Дж/кг
Мощность нагревателя (W)	50 Вт
Задержка включения (Δt)	5 с
Фактическая толщина наледи (h_{actual})	0,005 м
Начальная температура (T_{init})	-5 °C
Шаг интегрирования (dt)	1 с

Расчет основных параметров

Параметр	Формула	Расчет	Результат
Объем льда на пластине (V)	$V = \text{hactual } S$	$0,005 \text{ м} \cdot 0,01 \text{ м}^2$	$5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
Масса льда (m)	$m = \rho V$	$917 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$	$\approx 0,04585 \text{ кг}$
Энергия плавления (Q_{melt})	$Q_{\text{melt}} = m \lambda$	$0,04585 \text{ кг} \cdot 335 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$	$\approx 15360 \text{ Дж}$
Длительность фазового перехода (Δt_{ϕ})	$\Delta t_{\phi} = Q_{\text{melt}} / W$	$15360 \text{ Дж} / 50 \text{ Вт}$	$\approx 307,2 \text{ с}$

Расчет времени для нагрева до температуры плавления

- энергия для нагрева от -5 до 0 °С:

$$Q_{\text{heat}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,004585 \cdot 2100 \cdot 5 \approx 481,25 \text{ Дж};$$

- время для нагрева:

$$t_{\text{heat}} = \frac{Q_{\text{heat}}}{W} = \frac{481,25}{50} \approx 9,63 \text{ с.}$$

Моделирование работы двух датчиков ЧЭ

Моменты начала плавления:

ЧЭ 1:

Нагрев: $t = 0$ с. Плавление: $t_{\text{melt1}} = t_{\text{heat}} \approx 9,63$ с.

ЧЭ 2:

Нагрев: $t = 5$ с. Плавление: $t_{\text{melt2}} = 5 + t_{\text{heat}} \approx 14,63$ с.

Длительность фазового перехода:

Время плавления: $\Delta t_{\phi} = Q_{\text{melt}} / W \approx 307,2$ с.

Моменты завершения плавления:

ЧЭ 1: $t_{\text{end1}} = t_{\text{melt1}} + \Delta t_{\phi} \approx 316,83$ с.

ЧЭ 2: $t_{\text{end2}} = t_{\text{melt2}} + \Delta t_{\phi} \approx 321,83$ с.

Длительность общего плато:

$\Delta t_{\text{общ}} = t_{\text{end1}} - t_{\text{melt2}} \approx 302,2$ с.

Оценка толщины наледи:

$$h_{\text{est}} = \frac{W (\Delta t_{\text{общ}} + \Delta t)}{S \cdot \rho \cdot \lambda} \approx 0,005 \text{ м.}$$

Блочная схема имитационной модели

Для реализации предложенных способов обнаружения обледенения (снега/льда) необходимо определить структурное построение алгоритмов (рис. 1), функции программы контроля и разработать имитационную модель информационно-управляющей программы контроля состояния устройства обнаружения обледенения (снега/льда)

стрелочных переводов, способной выполнять полученные команды управления.

Программная реализация

Методология моделирования

Теоретическая база моделирования теплопередачи построена на классической теории теплопроводности, используемой для построения уравнения теплопередачи, современном справочнике по теплопроводности, содержащем методы численного решения уравнений, и основном учебнике по теплообмену, используемом для расчета коэффициентов теплопроводности материалов [3]. Численные методы расчета строились с использованием методов конечных разностей и их применения к задачам теплопроводности и моделирования процессов тепло- и массообмена, а также с алгоритмами численных методов [4, 5]. Механизмы фазовых переходов и процессы обледенения учитывали влияние температуры на структуру материала и материалы по расчету образования льда [5, 6].

Программный код на MATLAB

Программный код реализует динамическое моделирование температуры ЧЭ во времени и асинхронном включении (рис. 2). Для оценки функционирования датчика обледенения в реальных метеословиях и метода обнаружения обледенения на рабочей поверхности разработана и исследована компьютерная имитационная модель в среде MATLAB. Она позволяет произвести анализ протекающих тепловых процессов в системе и оценить влияние различных метеорологических условий на процесс обледенения. Модель учитывает такие параметры, как температура окружающей

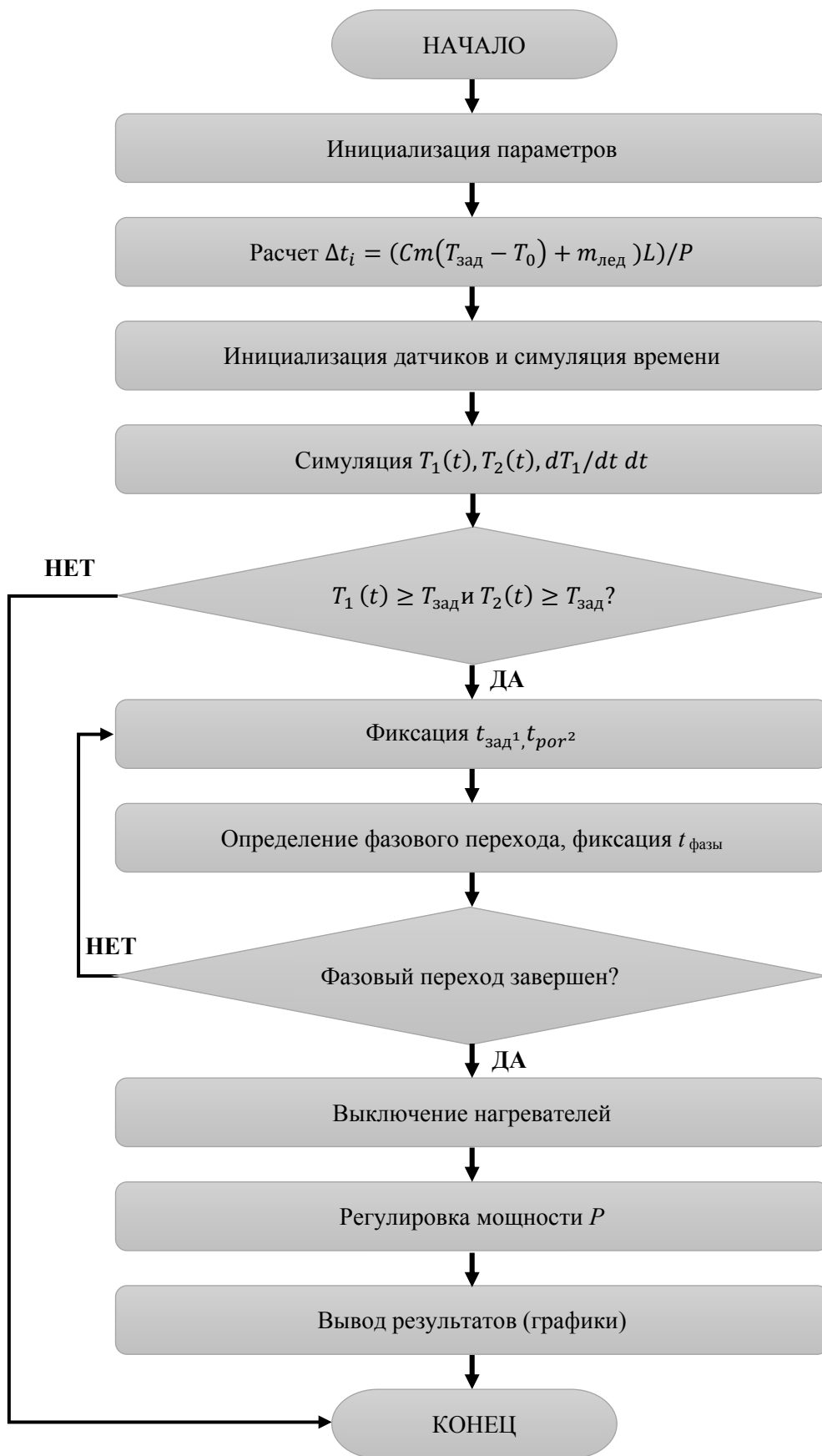


Рис. 1. Блок-схема алгоритмов

```

% Инициализация глобальных параметров
global W_sum rho L A dt threshold_deltaT max_thickness delta_t delta_t_phase;
W = 50; % Мощность одного нагревателя (Вт)
W_sum = 2 * W; % Суммарная мощность двух нагревателей (Вт)
rho = 917; % Плотность льда (кг/м³)
L = 335e3; % Удельная теплота плавления льда (Дж/кг)
A = 0.01; % Площадь поверхности (м²)
dt = 1; % Шаг времени (с)
threshold_deltaT = 2; % Пороговое значение разности температур (°C)
max_thickness = 0.05; % Максимальная допустимая толщина льда (м)
delta_t = 5; % Задержка включения второго нагревателя (с)
delta_t_phase = 307.2; % Продолжительность фазового перехода (с, из расчётов)

% Основной цикл
disp('Запуск системы электрообогрева...');

% 1. Сбор данных
[data] = collectData();
T1 = data.T1;
T2 = data.T2;
T_D0 = data.T_D0;
deltaT = data.deltaT;
t1_on = data.t1_on;
t2_on = data.t2_on;
t_current = data.t_current;

% 2. Обработка данных
[processedData] = processData(T1, T2, T_D0, deltaT, t1_on, t2_on, t_current);
T1_filtered = processedData.T1_filtered;
T2_filtered = processedData.T2_filtered;
t_phase = processedData.t_phase;

% 3. Оценка толщины льда
[h] = estimateIceThickness(T1_filtered, T2_filtered, t_phase, t1_on, t2_on);

% 4. Логирование
logData(T1_filtered, T2_filtered, t_phase, h);

% 5. Управление системой
[systemStatus] = manageSystem(T1_filtered, T2_filtered, t_phase, h);

disp('Система завершена. Статус:');
disp(systemStatus);

```

Рис. 2. MATLAB-код

среды, тип осадков и тепловые характеристики рабочей поверхности. Это позволяет имитировать реальные условия эксплуатации датчика обледенения и проверить его работоспособность в различных сценариях [7].

Графики результатов

Ниже приведены графики результатов моделирования (рис. 3–6).

График на рис. 3 показывает, что с увеличением мощности процесс плавления ускоряется.

Графики температур (рис. 4 и 5) подтверждают, что фазовый переход приводит к нулевому плато температуры.

Результаты моделирования (рис. 6) показывают, что при более низкой температуре требуется больше времени для достижения $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ перед фазовым переходом.

Заключение

Данная имитационная модель и ее программная реализация позволяют решать широкий спектр научных и практических вопросов, связанных с тепловыми процессами и фазовыми переходами в ледовом материале [6]. Среди них можно выделить следующие:

1. Анализ энергетического баланса и динамики фазового перехода

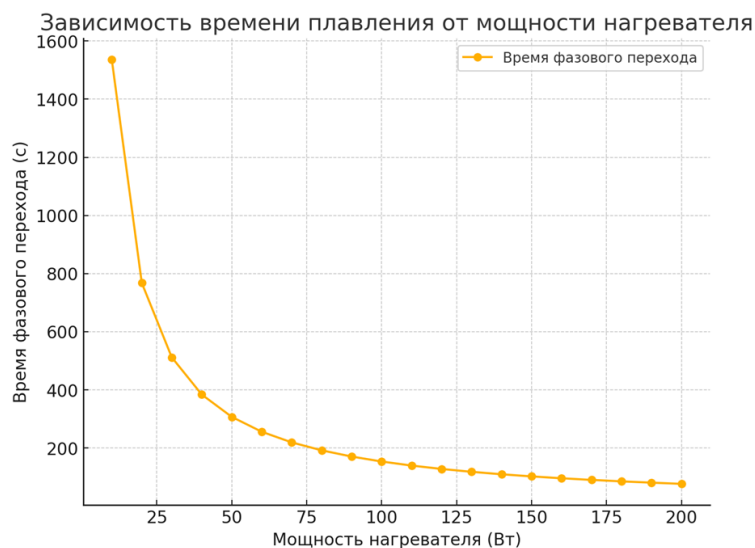


Рис. 3. Зависимость времени плавления от мощности нагревателя

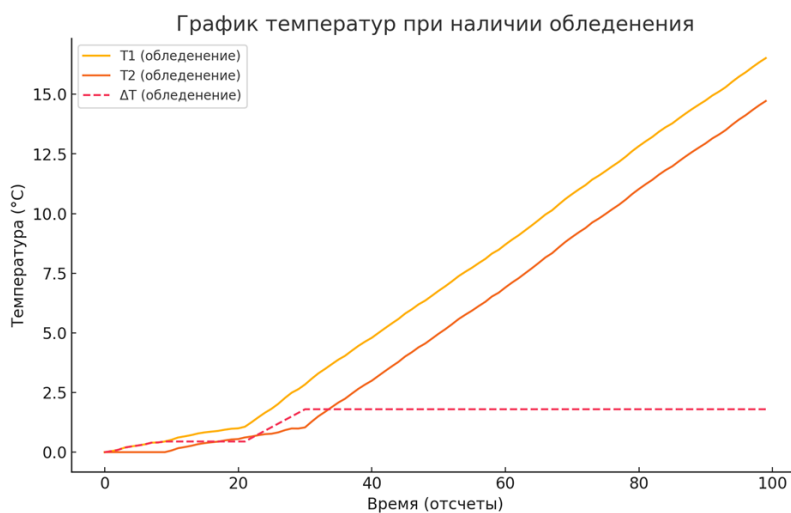


Рис. 4. Зависимость температуры ЧЭ от времени

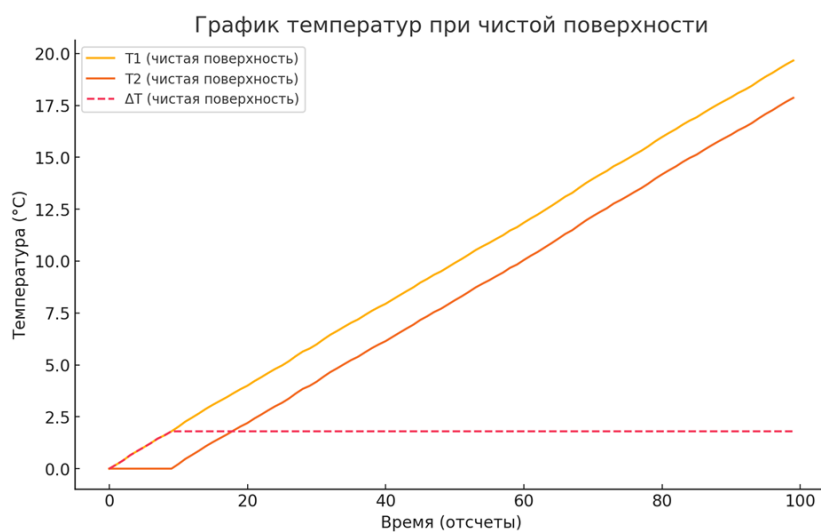


Рис. 5. График температур при чистой поверхности

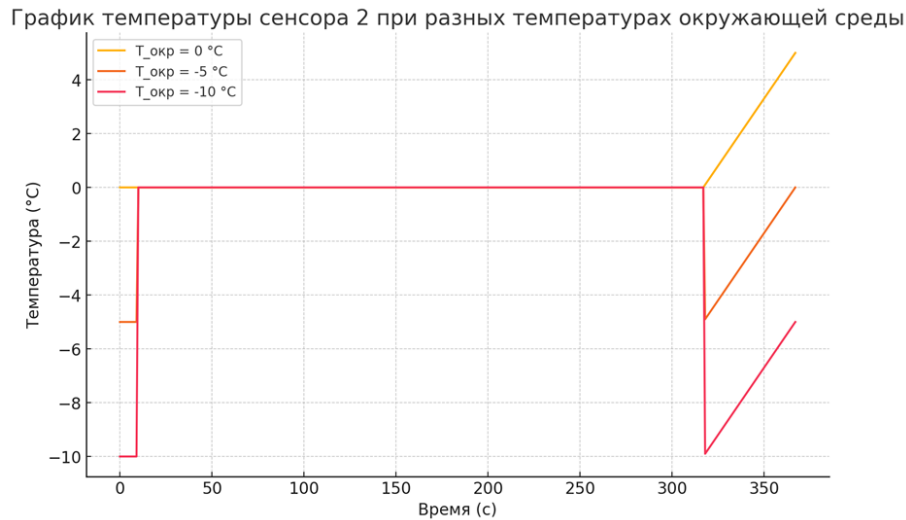


Рис. 6. Влияние температуры окружающей среды

Модель позволяет исследовать, как подводимая энергия распределяется между нагревом льда, его нагревом до температуры плавления и последующим фазовым переходом (накопление энергии на плавление). Это помогает понять и оптимизировать процессы, связанные с управлением температурными режимами и расчетом требуемой энергии для конкретных фазовых изменений.

2. Оптимизация систем обогрева/охлаждения

При использовании в инженерных и технологических приложениях (например, в холодильных установках, системах криоконсервирования или в процессах создания искусственного льда) модель позволяет оценить, как изменение мощности нагревателей (W_1 , W_2) и условия окружающей среды (например, конвективные и радиационные потери) влияют на скорость нагрева и образования ледового слоя. Это может помочь оптимизировать энергопотребление и параметры системы.

3. Прогнозирование образования или таяния льда

В метеорологии, климатологии или гидрологии модель может быть использована для прогнозирования динамики формирования и таяния ледового покрова, что важно для оценки влияния климатических изменений и разработки адаптационных мер.

4. Исследование влияния температурной зависимости физических свойств

Включение температурных поправок для теплоемкости и коэффициента теплопроводности

позволяет анализировать, как изменяются свойства льда вблизи точки фазового перехода и как это отражается на динамике процесса плавления или кристаллизации [6].

5. Моделирование сложных тепловых процессов в материалах

Программная реализация может служить базой для разработки более сложных моделей, учитывающих не только фазовый переход, но и другие механизмы теплообмена (например, влияние конвекции, радиационных эффектов, взаимодействие многослойных структур). Это актуально для материаловедения и инженерных расчетов при проектировании теплоизоляционных или фазово-переходных материалов.

6. Обучение и научно-исследовательская деятельность

Модель предоставляет наглядный пример применения численных методов для решения нелинейных задач теплообмена и фазовых переходов, что полезно для студентов, аспирантов и инженеров, занимающихся моделированием термических процессов.

Таким образом, имитационная модель позволяет не только проводить фундаментальные исследования в области термодинамики и физики фазовых переходов, но и применять полученные результаты для оптимизации практических систем в промышленности, энергетике, климатологии и других областях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент № 2763473 Российская Федерация, МПК В64D 15/20 (2006.01), E01B 7/24(2006.01), E01B 19/00(2006.01), E01H 8/08(2006.01). Способ и устройство определения толщины льда на рабочей поверхности датчика обледенения: № 2021115157: заявл. 26.05.2021: опубл. 29.12.2021 / Бараусов В. А., Григорьев П. В., Семенов А. Г.; заявители Бараусов В. А., Григорьев П. В. 21 с.
2. Heyun L., Xiaosong G., Wenbin T. Icing and Anti-Icing of Railway Contact Wires // *Reliability and Safety in Railway* / X. Perpiñà (ed.). Rijeka: Intech Open, 2019. Pp. 295–314. DOI: 10.5772/37141.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности: учебное пособие для студентов теплотехнических специальностей высших учебных заведений. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
4. Atmospheric Icing of Power Networks / M. Farzaneh (ed.). Dordrecht: Springer, 2008. 397 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8531-4.
5. Шилин А. Н., Дементьев С. С. Повышение надежности функционирования воздушных линий электропередачи в гололедный период: монография. Старый Оскол: Тонкие Научные Технологии, 2023. 180 с.
6. Дерюгин В. В., Васильев В. Ф., Уляшева В. М. Тепломассообмен: учебное пособие. 6-е изд., стер. СПб.: Лань, 2023. 240 с.
7. Moler C. B. Numerical Computing with MATLAB. Revised Reprint. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. 348 p.

Дата поступления: 13.05.2025

Решение о публикации: 16.05.2025

Simulation Model of an Asynchronous Method for Determining the Thickness of Ice on a Controlled Surface

Viktor A. Barausov — Executive Director. Research interests: intelligent heating systems.
E-mail: barausovv@gmail.com

IMSAT Group LLC, 7, Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Barausov V. A. Simulation Model of an Asynchronous Method for Determining the Thickness of Ice on a Controlled Surface. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 2 (42), Pp. 20–28. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-20-28. (In Russian)

Abstract. *The following paper sets out a simulation model of the method of ice thickness measurement on railway contact wires. The method is based on the asynchronous heating of two sensitive elements (SE) with a time difference between the switching on of each element. The determination of ice thickness is achieved through the analysis of the duration of the phase transition of ice into water. **Methods:** the classical theory of thermal conductivity was used in the construction of the heat transfer equation. A software model was implemented in the MATLAB environment, and calculations were performed of the dependence of melting time on heater power and ambient temperature. The paper presents the results of the modelling, the scientific novelty of the method and its practical application. **Purpose:** to develop a simulation model of a method for asynchronously determining the thickness of ice on the surface of contact wires. This methodology enables the calculation of ice thickness, incorporating the impact of external factors such as ambient temperature and heater power. The approach involves the development of a software model and the validation of this model through numerical experimentation. **Practical significance:** the utilization of simulation software facilitates the modelled operation of a sensor designed for the detection of ice or snow on a controlled surface, thereby offering the potential to address numerous scientific and practical issues.*

Keywords: *simulation model, asynchronous method, ice thickness determination, contact wire, phase transition*

REFERENCES

1. Barausov V. A., Grigorev P. V., Semenov A. G. Sposob i ustroystvo opredeleniya tolshchiny lda na rabochey poverkhnosti datchika obledeneniya [Method and Device for Determining Ice Thickness on the Working Surface of Ice-Formation Sensor], patent RU No. 2763473, published at December 29, 2021, 21 p. (In Russian)
2. Heyun L., Xiaosong G., Wenbin T. Icing and Anti-Icing of Railway Contact Wires. In: *Perpiña X. (ed.) Reliability and Safety in Railway*. Rijeka, Intech Open, 2019, Pp. 295–314. DOI: 10.5772/37141.
3. Lykov A. V. Teoriya teploprovodnosti: uchebnoe posobie [Theory of thermal conductivity: a tutorial]. Moscow, Vysshaya Shkola Publishing House, 1967, 599 p. (In Russian)
4. Farzaneh M. (ed.) Atmospheric Icing of Power Networks. Dordrecht, Springer, 2008, 397 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-8531-4.
5. Shilin A. N., Demytyev S. S. Povyshenie nadezhnosti funktsionirovaniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi v gololednyy period: monografiya [Improving the reliability of overhead power lines during icy periods: monograph]. Stary Oskol, Tonkie Naukoemkie Tekhnologii Publishing House, 2023, 180 p. (In Russian)
6. Deryugin V. V., Vasilyev V. F., Ulyasheva V. M. Teplomassoobmen: uchebnoe posobie [Heat and Mass Transfer: a tutorial]. Saint Petersburg, LAN Publishing House, 2023, 240 p. (In Russian)
7. Moler C. B. Numerical Computing with MATLAB. Revised Reprint. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008, 348 p.

Received: 13.05.2025

Accepted: 16.05.2025