

УДК 664.8.037:536.2:004.78

## ЦИФРОВОЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ В ХОЛОДОВОЙ ЦЕПИ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ

*Константинова Ю.С., студент*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент*

**Аннотация.** Работа посвящена мониторингу температур при перевозке продуктов. Автором создана модель, учитывающая теплоту дыхания плодов. Алгоритмы на языке С интегрированы в датчики для расчета срока годности в реальном времени. Новизна заключается в переходе к предиктивному анализу, повышающем точность на 15–20 %. Практическая значимость: сокращение логистических потерь на 15–20 % и обоснование схем расстановки датчиков. Результаты применимы в цифровизации логистики и проектировании IoT-систем.

**Ключевые слова.** Логистика скоропортящихся продуктов, теплота дыхания, микроконтроллеры, язык С, предиктивное моделирование, срок годности, датчики температуры.

### **Введение.**

В Беларуси вопросы продовольственной безопасности регулируются на двух уровнях: стратегическом (наличие продуктов в стране) и гигиеническом (безопасность еды для здоровья). В стране создана комплексная нормативно-правовая база, регламентирующая требования к температурным режимам на всех этапах обращения скоропортящейся продукции, что создает правовые основы для контроля качества и безопасности пищевых продуктов.

Холодовая цепь представляет собой непрерывную систему обеспечения требуемых температурных режимов при хранении и транспортировке скоропортящихся продовольственных товаров. Нарушение температурного режима приводит к финансовым потерям (миллиарды долларов ежегодно) и рискам для здоровья людей. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), ежегодные потери пищевых продуктов в мировом масштабе составляют около 1,3 млрд тонн, что эквивалентно трети всего производимого продовольствия. Значительная часть этих потерь (до 40 %) приходится на этапы хранения и транспортировки, причем основная причина – нарушения температурного режима [1]. Это огромные убытки для бизнеса и нехватка еды для людей. Экономические последствия разрыва холодовой цепи включают: прямые убытки от порчи продукции, репутационные потери для производителей и ритейлеров, риски для здоровья потребителей и связанные с этим юридические последствия, нерациональное использование ресурсов (энергия, транспорт, труд).

Цель работы – научиться с помощью формул и программирования предсказывать, как долго продукты останутся свежими в пути, и предложить простую систему, которая будет за этим следить.

### **Основная часть.**

Математическая модель теплообмена в контейнере учитывает формулу теплового баланса и закон Аррениуса, учитывающий количество теплоты, выделяемое при дыхании продуктов [2]. При перевозке «живых» продуктов нельзя пренебрегать эндогенным тепловыделением. Даже при качественной теплоизоляции внутренний источник теплоты от дыхания приводит к саморазогреву груза, что является критическим фактором риска для сохранности продукции. Биокинетика процессов порчи формализована нами с помощью уравнения Аррениуса. Несмотря на единую математическую форму, физический смысл коэффициентов различен для разных категорий продуктов: для фруктов и овощей уравнение описывает интенсивность дыхания (метаболический процесс, выделяющий теплоту и CO<sub>2</sub>); для мяса, рыбы, молока уравнение описывает скорость роста микрофлоры (процесс, ведущий к порче и потенциально опасный для здоровья). Данное различие было учтено в программной реализации путем использования различных наборов эмпирических коэффициентов для каждой категории товаров.

На рисунке 1 приведены рассчитанные по программе значения количества теплоты, выделяемого фруктами при различной температуре. Анализ данных рисунка 1 подтверждает гипотезу исследования: интенсивность дыхания (выделения количества теплоты) плодами имеет выраженную экспоненциальную зависимость от температуры окружающей среды. Пренебрежение этой составляющей приводит к систематической ошибке прогноза в сторону завышения остаточного срока годности на 15–20 %.

На рисунках 2–3 представлен срок годности продуктов в зависимости от температуры. Данные рисунков 2–3 наглядно демонстрируют иерархию устойчивости: четко виден ряд устойчивости продуктов (от самых лежких к самым скоропортящимся): фрукты (яблоки, апельсины) – молоко – мясо – рыба. Например, при 0...+4°C: яблоки (40,5 суток) > апельсины (27 суток) > молоко (3,6 суток) > мясо (2,25 суток) > рыба (0,9 суток). На основе представленных данных были

рассчитаны коэффициенты ускорения порчи ( $Q_{10}$ ), показывающие, во сколько раз сокращается срок годности при росте температуры на  $10^{\circ}\text{C}$ . Для яблок  $Q_{10} = 3,2$ , для апельсинов –  $3,0$ , для мяса –  $5,0$ , для рыбы –  $3,0$ , для молока –  $4,0$ , т.е. наиболее чувствительно к повышению температуры мясо, затем молоко. Фрукты и рыба в этом диапазоне имеют типичный  $Q_{10} \approx 3$ . Это подтверждает, что модельные коэффициенты в коде (где для мяса и рыбы экспонента больше) выбраны верно.

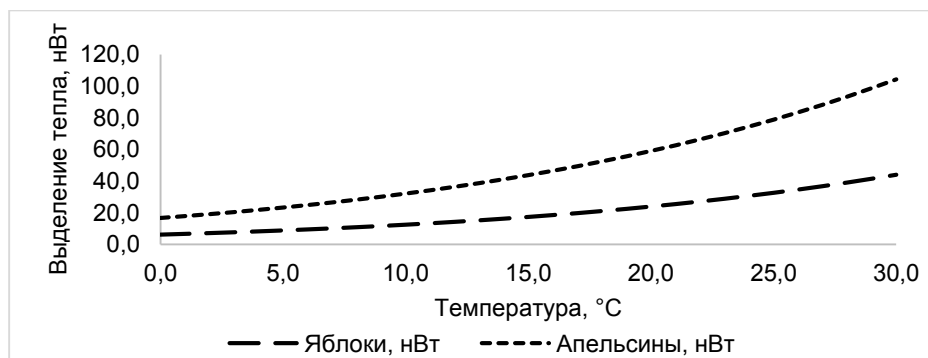


Рисунок 1 – Количество теплоты, выделяемое фруктами при различной температуре

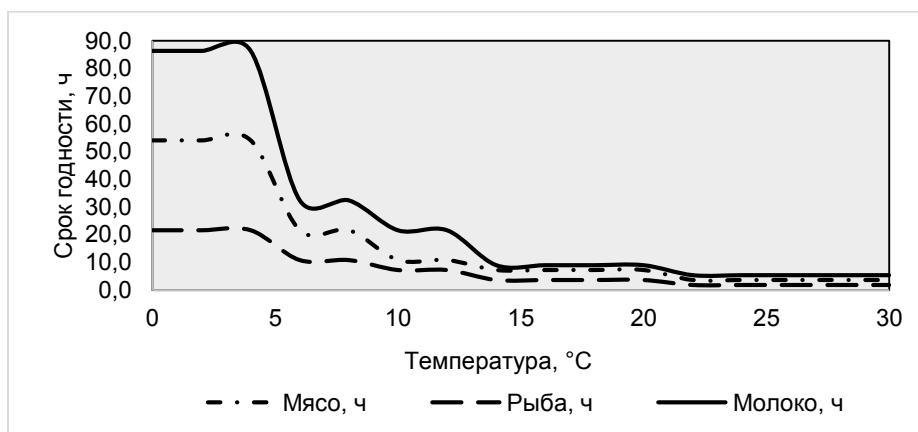


Рисунок 2 – Срок годности мяса, рыбы, молока при различной температуре

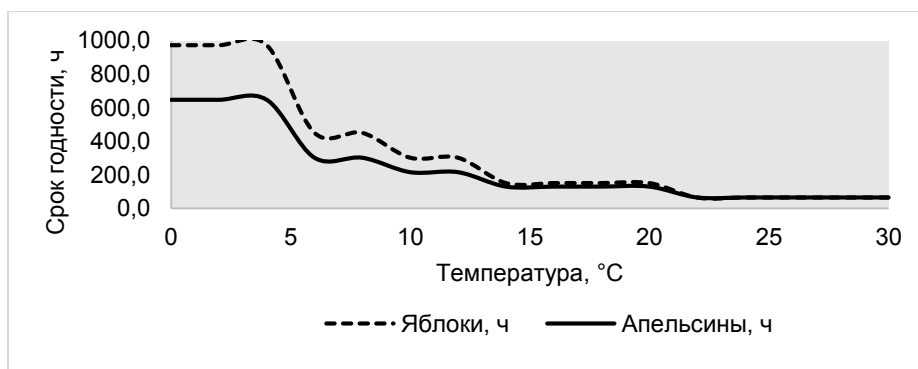


Рисунок 3 – Срок годности яблок, апельсинов при различной температуре

Рисунок 4 показывает, как эффект саморазогрева сокращает срок годности. Так, на 5-м часу разница сроков годности яблок с учетом саморазогрева и без него составляет 3,8 ч, на 47-м часу – 44,5 ч, т.е. рост температуры ускоряется со временем (нелинейная зависимость). Критическая точка: после  $30^{\circ}\text{C}$  (примерно 40-й час) срок годности падает ниже 100 ч, при  $31,09^{\circ}\text{C}$  срок составляет всего 55,7 ч. Следовательно, при длительном хранении необходимо активное охлаждение, а мониторинг температуры должен быть непрерывным; при достижении  $25^{\circ}\text{C}$  требуется срочное вмешательство.

Для корректной работы программы рекомендуется использовать следующее количество датчиков: обычный холодильник (до 1,2 м) – 1; длинная витрина (1,2–3,5 м) – 2; холодильная камера – 1–2. Датчики имеет смысл ставить в самых «опасных» местах: вверху, у двери, также рекомендуется размещать датчик в центре груза. Главное правило: датчик должен находиться в самом теплом месте.

Для реализации работы разработанного нами программного кода предлагается использовать следующую систему: микроконтроллер Arduino UNO R3, датчик температуры DS18B20, резистор 4,7 кОм, соединительные провода. Итоговая стоимость системы при использовании одного датчика – 50 руб., двух датчиков – 60 руб. В отличие от систем, используемых в настоящее время на практике (ThermoFleet, MOKOSMART совместно с Silicon Labs, Carrier ColdTrans), предлагаемая система не просто измеряет температуру, а рассчитывает по закону Аррениуса реальное тепловыделение продуктов и предсказывает, сколько времени осталось до порчи. Кроме того, предлагаемая система гораздо дешевле аналогов, позволяет учесть дыхание продуктов и выполнить прогноз окончания срока годности.

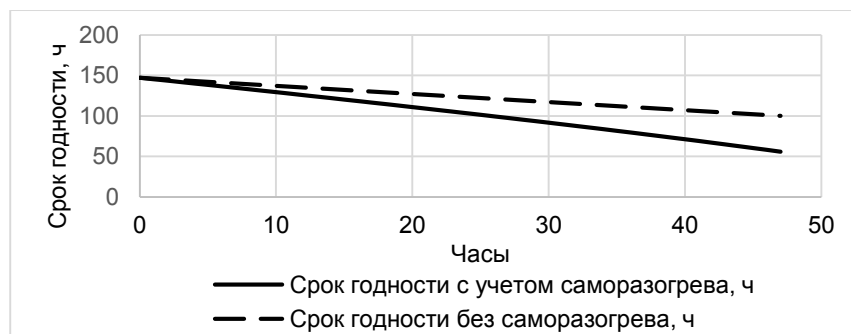


Рисунок 4 – Сравнение сроков годности яблок с учетом саморазогрева и без него

### **Заключение.**

Экономическая эффективность предложенной системы существенна. Так, при применении системы при перевозке транспортной компанией 100 т яблок в месяц экономия с учетом прогноза окончания срока годности и уменьшения потерь составит 9000 руб.; при месячном обороте сельского магазина 30000 руб. экономия в месяц – 900 руб.; для проблемных магазинов Минска (в 2025 г. – около 800 магазинов) при средних потерях магазина в год без системы 18000 руб. экономия – 8640000 руб. за год; для магазина сети «Евроопт» с оборотом 150000 руб/мес. экономия – 2250 руб/мес.

Программный алгоритм реализует две функции: расчет тепловыделения продукции на основе уравнения Аррениуса, что позволяет количественно оценивать внутренний источник тепла в контейнере и учитывать его в тепловом балансе, и прогнозирование остаточного срока годности на основе актуальных температурных данных и кинетических моделей порчи. Вместо констатации факта порчи продукции алгоритм предупреждает о потенциальных проблемах, позволяя логистическим операторам принять корректирующие меры: усилить охлаждение, изменить маршрут доставки, перенаправить партию на ближайший распределительный центр. Доказана экономическая эффективность подхода. Даже прототип на базе Arduino демонстрирует, что автоматизация мониторинга позволяет снизить потери продукции на 15–20 %, уменьшить риски нарушений санитарных норм и штрафов, повысить прозрачность логистических процессов для участников цепи. Созданная система мониторинга представляет собой законченное техническое решение, которое переводит управление холодовой цепью на качественно новый уровень – от контроля температуры к интеллектуальному прогнозированию и предотвращению потерь на основе физико-математических моделей и микроконтроллерных технологий.

### **Список использованных источников:**

1. Термодинамика и теоретические основы холодильной техники : учебно-методическое пособие / А.М. Ибраев, Т.Н. Мустафин, С.В. Визгалов [и др.]. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2020. – 96 с.
2. Капица, П.Л. Основы техники глубокого холода : монография / П.Л. Капица; под ред. Б.Д. Краковского. – М. : Экон-Информ, 2019. – 272 с.

UDC 664.8.037:536.2:004.78

## DIGITAL MONITORING OF TEMPERATURE CONDITIONS IN THE FOOD CHILLING CHAIN

*Konstantinova Yu.S., student*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Savilova Yu.I. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

**Annotation.** The study focuses on temperature monitoring in food logistics. The author developed a model accounting for respiration heat of produce. Algorithms in C language are integrated into sensors to calculate shelf life in real-time. The novelty lies in the shift to predictive analysis, increasing accuracy by 15–20 %. Practical value: reduction of logistics losses by 15–20 % and optimization of sensor placement. Results are applicable to logistics digitalization and IoT system design.

**Keywords.** Perishable goods logistics, respiration heat, microcontrollers, C language, predictive modeling, shelf life, temperature sensors.