

Концепция разработки ротационных вискозиметров на базе технологий промышленного интернета вещей

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

² Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

С. А. Рылов¹, И. В. Кротов², М. М. Благовещенская²,
В. Г. Благовещенский¹, И. Г. Благовещенский¹, А. Е. Яблоков²

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Сергей Андреевич Рылов

E-mail: rylov@mirea.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Рылов, С. А., Кротов, И. В., Благовещенская, М. М., Благовещенский, В. Г., Благовещенский, И. Г., & Яблоков, А. Е. (2024). Концепция разработки ротационных вискозиметров на базе технологий промышленного интернета вещей. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(4), 70-83. <https://doi.org/10.36107/spfr.2024.4.453>

ПОСТУПИЛА: 15.01.2024

ДОРАБОТАНА: 23.11.2024

ПРИНЯТА: 16.12.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 27.12.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Вязкость является одним из основных параметров, характеризующих оптимальное протекание технологических процессов и определяющих качество готового продукта. Показаны недостатки используемых методов контроля вязкости (в том числе указанных в многочисленных ГОСТах), проводимого в лабораториях пищевых предприятий, забор проб при этом осуществляется вручную. В связи с этим возникает необходимость в создании средств автоматического контроля вязкости пищевых масс, работающих в производственных условиях в режиме реального времени с использованием интеллектуальных технологий.

Цель: Разработка концепции создания интеллектуальных цифровых вискозиметров на базе технологий промышленного интернета вещей, работающих в режиме реального времени на линиях производства.

Объекты и методы исследования: объектом исследования являются приборы автоматического контроля вязкости пищевых продуктов. Проведен обзор исследований, показывающих важность контроля вязкости различных пищевых продуктов, а также существующих методов и средств контроля вязкости. Даются сведения о последовательности выполнения исследования. Анализ результатов осуществленных экспериментальных исследований позволил выбрать ротационный метод автоматического контроля вязкости с использованием промышленного интернета вещей. Приведено описание представленной в статье конструкции разработанного датчика вязкости, даны полученные технические характеристики. Поставленные в исследовании задачи решены с использованием технологий интернет вещей. Обработка результатов исследований и анализ данных проводились с применением MatLab. Исходными материалами для разработки концепции вискозиметра являлись протоколы передачи данных IoT: AMQP, JMS, REST, DDS.

Результаты: Исследована и обоснована архитектура интеллектуального ротационного автоматического вискозиметра, которая была дополнена в результате исследований коммуникационными модулями контроля и управления. Показана возможность гибкой автоматической конфигурации каналов передачи данных. Продемонстрирована необходимость использования дополнительных периферийных модулей для реализации функций IoT вискозиметра. Разработана аппаратно-программная архитектура IoT ротационного вискозиметра с возможностью интеграции передачи данных в другие IoT платформы. Спроектирован и собран прототип IoT ротационного вискозиметра на базе технологий промышленного интернета вещей. Представлено программное взаимодействие нескольких IoT вискозиметров.

Выводы: Интеграция разработанного вискозиметра в сеть промышленного интернета вещей дает возможность автоматизировать контроль вязкости пищевых масс в потоке, минимизировать время обработки данных и их передачи. Появляется возможность сквозной передачи данных для реализации многоуровневой сетевой архитектуры, что упрощает интеграцию данных контроля вязкости в IoT системы предприятия. Это позволяет увеличить надежность существующих АСУТП пищевых предприятий за счет уменьшения человеческого фактора и автоматизированной передачи и обработки данных в существующую на предприятиях систему управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

цифровой ротационный вискозиметр; автоматический контроль в потоке; промышленный интернет вещей

The Concept of Developing Rotational Viscometers Based on Industrial Internet of Things Technologies

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

² Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russian Federation

Sergey A. Rylov¹, Igor V. Krotov², Margarita M. Blagoveshchenskaya², Vladislav G. Blagoveshchensky¹, Ivan G. Blagoveshchensky¹, Alexander E. Yablokov²

CORRESPONDENCE:

Sergey A. Rylov,

E-mail: rylov@mirea.ru

FOR CITATIONS:

Rylov, S.A., Krotov, I.V., Blagoveshchenskaya, M.M., Blagoveshchensky, V.G., Blagoveshchensky, I.G., & Yablokov, A.E. (2024). The concept of developing rotational viscometers based on industrial internet of things technologies. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(4), 70-85. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.453>

RECEIVED: 15.01.2024

REVISED: 23.11.2024

ACCEPTED: 16.12.2024

PUBLISHED: 27.12.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Viscosity is one of the key parameters defining the optimal flow of technological processes and determining the quality of the final product. The drawbacks of currently used viscosity control methods (including those specified in numerous GOST standards), which are typically conducted in food enterprise laboratories with manual sampling, are highlighted. This necessitates the creation of automatic viscosity control devices capable of operating in real-time production conditions using artificial intelligence.

Purpose: To develop a concept for creating intelligent digital viscometers based on Industrial Internet of Things (IIoT) technologies, operating in real-time on production lines.

Materials and Methods: The focus of the research is on devices designed for the automatic control of viscosity in food products. A literature review was performed highlighting the significance of viscosity control for different food items and examining the current methods and instruments used for viscosity control. The study outlines the sequence of research activities. The analysis of experimental results enabled the selection of a rotational method for automatic viscosity control using IIoT technologies. The article describes the design of the developed viscosity sensor and presents its technical characteristics. The research objectives were addressed using IIoT technologies. Data processing and analysis were performed using MATLAB. Data transmission protocols such as AMQP, JMS, REST, and DDS served as the foundational materials for developing the viscometer concept.

Results: The architecture of an intelligent rotational automatic viscometer was studied and substantiated. Communication modules for monitoring and control were added based on the research findings. The feasibility of flexible automatic configuration of data transmission channels was demonstrated. The necessity of additional peripheral modules for implementing IIoT viscometer functions was established. The hardware-software architecture of an IIoT rotational viscometer was developed, allowing for data transmission integration into other IIoT platforms. A prototype of an IIoT rotational viscometer based on IIoT technologies was designed and assembled. The software interaction between multiple IIoT viscometers was also presented.

Conclusion: Integrating the developed viscometer into the Industrial Internet of Things network enables the automation of in-stream viscosity control of food masses, minimizing data processing and transmission time. This facilitates seamless data transmission for implementing a multi-level network architecture, simplifying the integration of viscosity control data into an enterprise's IIoT systems. Consequently, this improves the reliability of existing automated control systems at food enterprises by reducing human error and automating data transfer and processing within the existing management systems.

KEYWORDS

digital rotational viscometer; in-stream automatic control; Industrial Internet of Things

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пищевая промышленность России представляет собой одну из стратегических отраслей экономики, которая призвана обеспечить население страны необходимыми по количеству и качеству продуктами питания (Благовещенский, 2024; Кучумов и соавт., 2023). Основная задача управления качеством пищевой продукции — обеспечить стабильность производственных процессов, не допустить появления брака и других несоответствий выпускаемых пищевых продуктов установленным требованиям (Благовещенский и соавт., 2021). Поэтому для эффективного управления производством необходимо наличия достоверных данных о показателях качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции (Благовещенский, 2018; Благовещенский и соавт., 2022). При этом важно, чтобы данные были получены в кратчайшие сроки, так как оперативность, достоверность и своевременность получения данных значительно влияет на скорость и правильность принятия решений (Благовещенский и соавт., 2022; Благовещенский, 2020).

Одним из основных параметров, определяющих качество сырья, полуфабрикатов и готовой пищевой продукции, характеризующих оптимальное протекание технологических процессов в установленном и неустановленном режимах и широко используемых при создании систем автоматического регулирования и управления этими процессами является вязкость (Кротов и соавт., 2023; Благовещенский и соавт., 2023; Alamri et al., 2012; Brock et al., 2008; Kuo et al., 2008). Это объясняется как простотой измерения данного параметра, так и тем, что вязкость тесно связана со структурой вещества и хорошо отражает изменения в молекулярном строении исследуемой массы, трудно улавливаемые другими методами физико-химического анализа (Haidekker et al., 2002; Sahasrabudheb et al., 2017; Благовещенский, 2017).

Существующие в настоящее время методы контроля вязкости пищевых масс далеки от совершенства, поскольку оценку реологических свойств проводят в лабораториях пищевых предприятий лаборанты-технологи. Забор проб и темперирование контролируемых масс при этом осуществляется вручную (Благовещенский, 2018; Xiaohong, 2002; Thirawong et al., 2008). При этом вязкость

определяют по методу выборочного отбора проб из партии отдельных образцов продукции, хотя в соответствии с существующим ГОСТом контроль вязкости должен проводиться на протяжении всей смены этого производства и своевременно влиять на качество получаемой продукции (Dhrisyal et al., 2023; Балыхин и соавт., 2017a; Балыхин и соавт., 2019). Таким образом, существующий контроль не позволяет реализовать автоматическое управление качеством готовой пищевой продукции и имеет фактор субъективности (Ding, 2022; Балыхин и соавт., 2017a; Балыхин и соавт., 2017b).

Назрела необходимость повышения объективности и своевременности контроля вязкости пищевой продукции за счет создания средств автоматического контроля, работающих непрерывно в производственных условиях в режиме реального времени на базе использования высокоэффективных интеллектуальных технологий. Проведенные исследования в области интеллектуальных технологий показали, что высокоэффективной современной технологией является технология промышленного интернета вещей (Averiyanihin et al., 2021; Jadaun et al., 2023; Благовещенский, 2018; Кучумов и соавт., 2023; Рылов, 2023; Рылов и соавт., 2022). Однако авторами этих работ не рассматриваются вопросы, связанные с разработкой концепции создания автоматических цифровых вискозиметров, работающих в режиме реального времени на линиях производства, на базе интеллектуальных технологий промышленного интернета вещей, поэтому данный вопрос является актуальным до настоящего времени. Успешное решение этой задачи позволит: непрерывно, в потоке, на линии производства контролировать вязкость полуфабрикатов и готовой продукции в течение всего технологического процесса; обеспечить стабильность технологических процессов, существенно уменьшить уровень брака, снизить потери рабочего времени, сырья и энергии, повысить качество готовых изделий.

Целью данного исследования является разработка концепции создания автоматических цифровых вискозиметров, работающих в режиме реального времени на линиях производства, на базе интеллектуальных технологий промышленного интернета вещей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектом исследования являются ротационные вискозиметры контроля качества пищевых продуктов и процессы автоматического сбора, анализа и обработки информации в задачах непрерывного контроля вязкости в режиме реального времени, работающих на линиях производства, с экспериментальными исследованиями оптимальной конструкции приборов, их возможности использовать высокоэффективные интеллектуальные технологии, регистрации результатов измерения в цифровом виде.

Методы, материалы и инструменты

Поставленные в исследовании задачи решены с использованием следующих методов: технологии промышленного интернета вещей, теории реологии, элементов теории искусственного интеллекта, методов системного анализа и математической статистики. Обработка результатов исследований и анализ данных производилась с применением MatLab.

Исходными материалами для разработки концепции вискозиметра являлись протоколы передачи данных IoT: AMQP, JMS, REST, DDS. Инструментом для реализации быстрого действия обработки информации внутри вискозиметра была операционная система реального времени FreeRTOS (Averiyanihin, 2021, p. 17–33).

Для разработки программного обеспечения и прошивки вискозиметра использовались следующие инструменты: ПК с характеристиками: Процессор Intel Xeon CPU E5–2670v3 @2.30GHz, Память 24 Гб DDR4, SSD 256Гб, ОС Windows 10 x64. Для организации сети с включением вискозиметра использовался сетевой роутер Mikrotik RB2011UiAS-2HnD-IN 5x10/100. Для разработки программного обеспечения системы управления для Raspberry PI Pico Zero использовалось SDK от разработчиков аппаратной архитектуры RP2040. Для реализации быстрого действия обработки информации внутри датчика использовалась операционная система реального времени FreeRTOS (Аверьянихин и соавт., 2020, с. 56–63). В качестве среды разработки на языке

программирования C использовалось ПО Visual Studio Code (Shivam et al., 2023, pp. 33–38). Для отладки вывода информации в COM порт датчика использовалось ПО PuTTY. Для изготовления прототипа корпуса вискозиметра, используемого в экспериментальных исследованиях, был задействован FDM 3D принтер Anet A8. В работе применялись методы декомпозиции по уровням автоматизации и декомпозиции по функционалу, выполняемому отдельными аппаратными компонентами системы; а также методы обобщения информации из современных источников по тематике исследования.

Технологии промышленного интернета вещей (IIoT)

Проведенные исследования возможности использования интеллектуальных технологий для автоматического контроля вязкости пищевых масс в потоке показали перспективность применения технологии промышленного интернета вещей (IIoT) хранить в себе информацию, а также передавать актуальные измеренные данные датчиков вязкости и интегрироваться в системы ЛИМС (LIMS), систему удаленного технического обслуживания (ТОиР). Помимо этого, использование подходов промышленного интернета вещей позволяет операторам и технологам гибко контролировать параметры процесса. Возможности датчиков вязкости на базе использования технологии интернета вещей представлены на Рисунке 1.

Рисунок 1

Возможности датчиков вязкости на базе использования технологии интернета вещей

Figure 1

Capabilities of Viscosity Sensors Based on Internet of Things Technology



Оборудование

В исследованиях был использован автоматический ротационный вискозиметр (Благовещенская, 1991). Вискозиметр состоит из двух автономных, конструктивно законченных блоков, соединенных между собой: датчика вязкости и блока цифровой индикации. В качестве блока индикации использован серийно выпускаемый цифровой тахометр типа ФТИ-1. Схема конструкции автоматического ротационного датчика вязкости представлена на Рисунке 2.

Внутри датчика вязкости смонтированы: электродвигатель 1, вращающий чувствительный элемент (ЧЭ) 5; электромагнитная муфта сцепления 2; соединяющая электродвигатель 1 с валом ЧЭ 5; диск 3 фототахометра с семьюдесятью двумя отверстиями (прорезями), закрепленный на валу ЧЭ 5 и расположенный между лампочкой Н1 и фотодиодом, помещенных в специальный патрон 4; электронный блок управления 6, предназначенный для определения момента достижения ЧЭ 5 заданной частоты вращения и управления работой прибора в целом; а также элементы электрической схемы. Конструкция прибора позволяет менять тела вращения, т.е. в зависимости от необходимого диапазона измерения вязкости и условий работы, на валу можно устанавливать ЧЭ различных размеров и конфигураций (цилиндры, диски, конусы различных размеров, и т.д.). При измерении прибором вязкости ЧЭ первичного преобразователя либо помещается в измерительную ячейку с исследуемой массой, которая может быть,

как проточной (при определении вязкости МПМ в потоке), так и не проточной (при определении вязкости в лабораториях). Вискозиметр питается от сети переменного тока напряжением 220В.

Неотъемлемой частью цифрового ротационного вискозиметра является измерительная ячейка, представляющая собой сосуд для заполнения ее исследуемой массой, имеющий клапаны для ввода и слива массы, а также снабженный водяной рубашкой для термостатирования исследуемой массы с двумя штуцерами для подвода к рубашке теплой воды (Рисунок 3).

Поскольку конструкция, форма и размеры измерительной ячейки оказывают значительное влияние на диапазон контролируемой вязкости пищевых масс и погрешность результатов ее измерения, нами были проведены экспериментальные исследования по определению вязкости шоколадных масс при использовании измерительных ячеек различной формы, размеров, конструкций. Меняли также расположение клапанов для ввода и слива исследуемой массы, что приводило к изменению глубины погружения чувствительного элемента в контролируемую смесь. Анализ полученных данных позволил нам выбрать оптимальную форму измерительной ячейки (цилиндрическую), ее размер ($H = 0,25$ м $\varnothing 0,20$ м), а также конфигурацию, размеры и местоположение чувствительного элемента, находящегося внутри измерительной ячейки. Полученную техническую характеристику смотри в Таблице 1.

Рисунок 2.

Схема конструкции автоматического ротационного датчика вязкости

Figure 2.

Diagram of the Design of an Automatic Rotational Viscosity Sensor

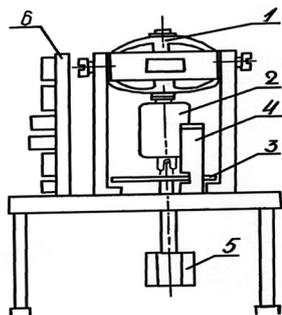


Рисунок 3

Измерительная ячейка цифрового ротационного вискозиметра

Figure 3

Measuring Cell of a Digital Rotational Viscometer



Таблица 1

Техническая характеристика

Table 1

Technical Specifications

Предел измерения вязкости, Па с	2÷25
Относительная погрешность, %	±2,5
Напряжение питания, В	220 ± 5÷10
Габаритные размеры, м, не более:	
первичный преобразователь вязкости	0,35 × 0,12 × 0,25
блок индикации	0,25 × 0,10 × 0,08
Масса прибора, кг, не более	5,0

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования совершенствования структуры и конструкции интеллектуальных цифровых ротационных вискозиметров на базе технологий интернета вещей

Изучены возможности технологий интернета вещей для создания интеллектуального цифрового ротационного вискозиметра. Разработана структура интеллектуального ротационного вискозиметра на базе технологий интернета вещей. Осуществлен выбор средств его реализации.

Для создания интеллектуального цифрового ротационного вискозиметра изучены возможности технологий интернета вещей. Для этого исследована возможная концептуальная архитектура такого датчика вязкости. Полученная общая структура основных элементов интеллектуального ротационного датчика вязкости на базе промышленного интернета вещей представлена на Рисунке 4.

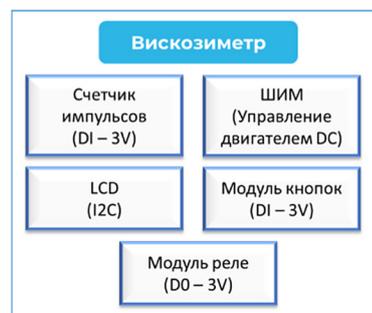
В результате проведенных экспериментальных исследований на автоматическом ротационном вискозиметре установлено, что исследуемый датчик вязкости имеет устаревшие шины и протоколы передачи данных. Это не позволяет выполнить интеграцию подобных устройств в современные IoT конвейерные производства на пищевых предприятиях.

Рисунок 4

Общая структура интеллектуального ротационного датчика вязкости

Figure 4

General Structure of an Intelligent Rotational Viscosity Sensor



Для интеграции датчика в сеть промышленного интернета вещей архитектура автоматического ротационного вискозиметра была дополнена модулями дополнительной коммуникации, например, Wi-Fi, Ethernet или др. Разработанная структура вискозиметра с дополненными модулями коммуникации представлена на Рисунке 5.

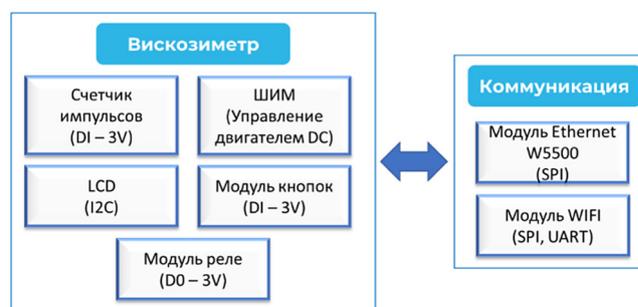
В качестве управляющего микропроцессора был выбран кристалл на базе архитектуры Cortex M0+ (Ding, Fan, 2022, pp. 479–496). В качестве готовой архитектуры была выбрана RP2040 (Dhrisya1 et al., 2023, pp. 402–405).

Рисунок 5

Структура ротационного вискозиметра с дополнительными коммуникационными модулями

Figure 5

Structure of a Rotational Viscometer with Additional Communication Modules



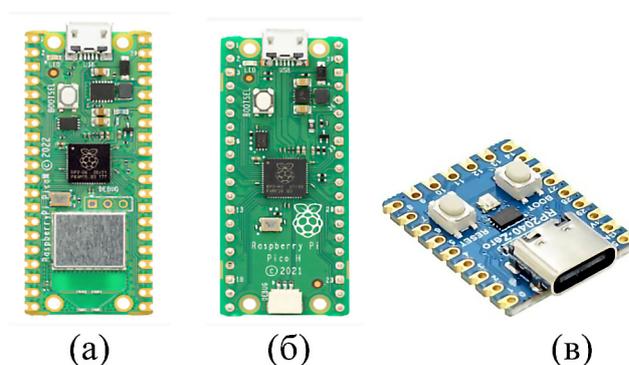
Экспериментальные исследования совершенствования архитектуры интеллектуальных цифровых ротационных вискозиметров на базе технологий интернета вещей

Архитектура RP2040 имеет несколько модификаций — Raspberry Pi Pico W (Рисунок 6а), Raspberry Pi Pico (Рисунок 6б) и Raspberry Pi Pico Zero (Рисунок 6в).

В качестве готовой платы для реализации вискозиметра была выбрана плата Raspberry Pi Pico Zero в связи с ее минимальными размерами, имеющая следующие характеристики: платформа RP2040; CPU ARM Cortex M0+ (2x 133 МГц) 32бит; RAM: 264 КБ; Flash-память: 2 МБ; 26 GPIO; 2 x UART; 2 x SPI; 2 x I2C; 16 каналов ШИМ; Часы реального времени (RTC); Датчик температуры; Входное напряжение питания 3,3–5В.

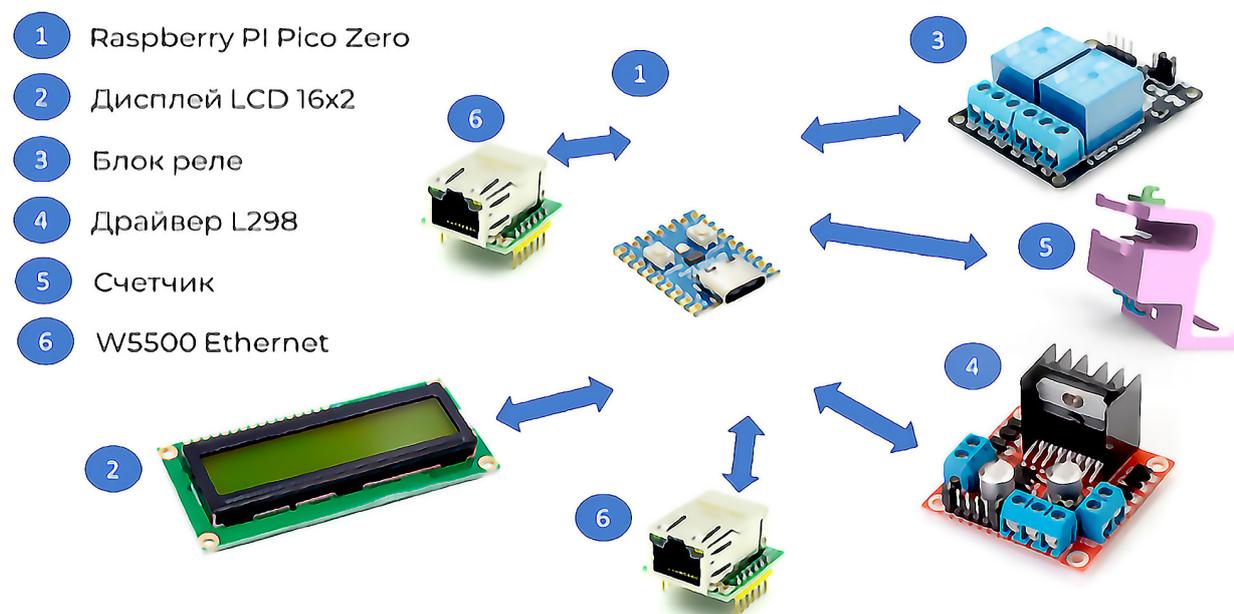
Осуществлен выбор дополнительных периферийных модулей, используемых для реализации необходимых функций IoT вискозиметра (Рисунок 7).

Рисунок 6
Варианты модификаций микроконтроллера Raspberry Pi Pico
Figure 6
Variants of Raspberry Pi Pico Microcontroller Modification



Примечание. Raspberry Pi Pico W с Wi-Fi модулем (а), Raspberry Pi Pico без модуля Wi-Fi (б), Raspberry Pi Pico Zero (в)
Note. Raspberry Pi Pico W with Wi-Fi module (a), Raspberry Pi Pico without Wi-Fi module (b), Raspberry Pi Pico Zero (c)

Рисунок 7
Дополнительные периферийные модули
Figure 7
Additional Peripheral Modules



Исследования по изучению, анализу и выбору инструментов для реализации быстрогодействия обработки информации внутри интеллектуального датчика вязкости

Изучены, проанализированы и выбраны инструменты для реализации быстрогодействия обработки информации внутри интеллектуального датчика вязкости. Для этого был проведен анализ существующих протоколов связи, который показал, что для реализации возможности интеграции вискозиметра с IoT и другими промышленными системами необходимо использовать стандартизированный протокол связи. На Рисунке 8 представлен сетевой стек и протоколы передачи данных IoT платформы.

Основными стандартами передачи данных в IIoT промышленных системах являются: MQTT; DDS; OPC UA; TSN.

В промышленных системах автоматизации в пищевых производствах используются надежные шины и каналы связи. При этом необходимо иметь возможность гибкой автоматической конфигурации каналов передачи данных. OPC UA в отличие

от MQTT, DDS и TSN стандартов позволяет в автоматическом режиме без предварительной настройки организовать передачу данных между всеми компонентами системы.

Программное обеспечение работы интеллектуального ротационного вискозиметра в потоке

При проведении экспериментальных исследований была выполнена сборка прототипа и разработано программное обеспечение. На Рисунке 9 представлена таблица подключений дополнительных периферийных модулей к микроконтроллеру Raspberry PI Pico Zero.

Прототип устройства был размещен в корпусе, разработанном с учетом компонентов. Корпус был распечатан на 3D принтере. На Рисунке 10 представлен внешний вид собранного прототипа.

В качестве основы программного обеспечения IoT вискозиметра была выбрана операционная система FreeRTOS (Oliveira & Lima, 2023). Данная операционная система позволяет минимизировать время

Рисунок 8
Сетевой стек и протоколы передачи данных IIoT платформы
Figure 8
Network Stack and Data Transfer Protocols of the IIoT Platform



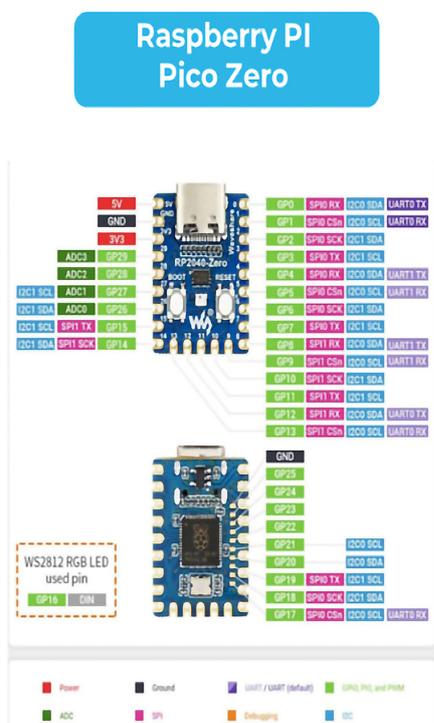
Примечание. Из Рылов и соавт. (2022).
Note. From Rylov et al. (2022).

Рисунок 9

Таблица подключений к микроконтроллеру Raspberry Pi Pico Zero

Figure 9

Connection Table for the Raspberry Pi Pico Zero Microcontroller



Вискозиметр		RP2040	
Драйвер L298	PWM	GP4	GP4
	DO1	GP5	GP5
	DO2	GP6	GP6
Модуль реле	DO3	GP7	GP7
	DO4	GP8	GP8
Модуль кнопок	DI1	GP9	GP9
	DI2	GP25	GP25
	DI3	GP24	GP24
Счетчик импульсов	DI4	GP23	GP23
	DO5	GP22	GP22
Регулятор скорости двигателя	ADC	ADC2	GP28
	LCD	I2C SDA	I2C1 SDA
LCD	I2C SCL	I2C1 SCL	GP15
	W55001	SPI CS	SPIO CSn
SPI SCK		SPIO SCK	GP2
SPI RX		SPIO RX	GP0
W55002	SPI TX	SPIO TX	GP3
	SPI CS	SPII CSn	GP13
W55002	SPI SCK	SPII SCK	GP10
	SPI RX	SPII RX	GP12
	SPI TX	SPII TX	GP11

Рисунок 10

Прототип интеллектуального ротационного IoT вискозиметра

Figure 10

Prototyp of an Intelligent Rotational IoT Viscometer



обработки данных и их передачи. Основные задачи (Tasks), выполняемые в ОС FreeRTOS: клиент OPC UA, алгоритм работы вискозиметра, диагностика, синхронизация времени (клиент NTP). В промышленных системах IoT датчики имеют возможность

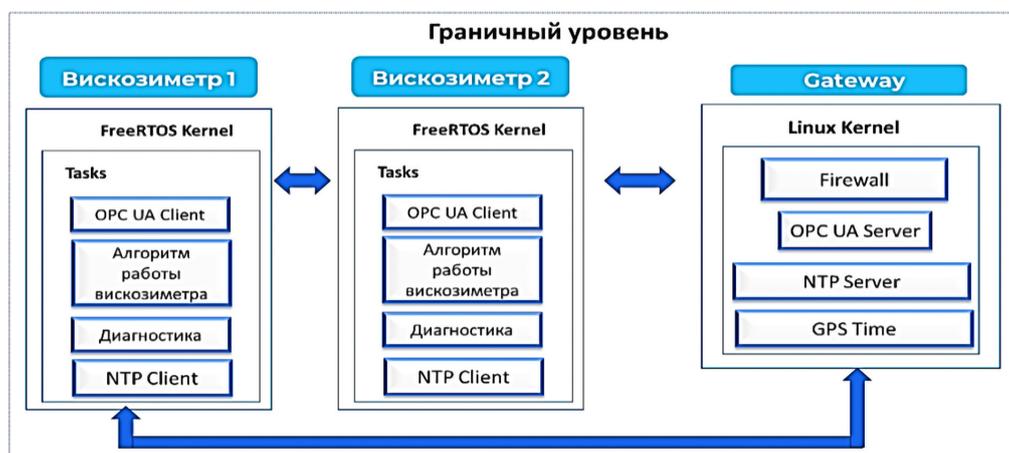
сквозной передачи данных для реализации многоуровневой сетевой архитектуры.

Аппаратно-программный комплекс интеллектуального ротационного цифрового вискозиметра на базе технологий промышленного интернета вещей

На Рисунке 11 представлен аппаратно-программный комплекс программного взаимодействия нескольких IoT вискозиметров, объединенных последовательно друг с другом. Для надежности сетевых соединений реализована кольцевая топология сети.

В соответствии с IIRA IoT (Leitão et al., 2023) концепцией вискозиметры находятся на “граничном уровне”. Все потоки данных с вискозиметров, вторичная обработка и фильтрация выполняются в “Gateway” (Ding & Fan, 2023) устройстве, которое также находится на “граничном уровне”. Каждый

Рисунок 11
Программная архитектура IIoT
Figure 11
Software Architecture of IIoT



из вискозиметров синхронизирует время с NTP сервером, который находится в "Gateway" устройстве. "Gateway" берет время посредством GPS (Jacoby et al., 2023) модуля. Таким образом, отсутствует незащищенный канал связи с Internet, при этом сохраняется возможность синхронизации времени.

тического определения вязкости нефтепродуктов ВУН-20 (Ding, 2022; Балыхин и соавт., 2017а; Балыхин и соавт., 2017b) также является лабораторным и не позволяет реализовать автоматическое управление качеством готовой пищевой продукции в режиме реального времени на линиях производства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Цель исследования, состоящая в разработке концепции создания автоматических цифровых вискозиметров, работающих в режиме реального времени на линиях производства, на базе интеллектуальных технологий промышленного интернета вещей, достигнута, изучены закономерности и сформированы основные этапы их создания.

Практически не исследовано влияние использования интеллектуальных технологий на минимизацию времени обработки данных и их передачу в сеть промышленного интернета. Также к настоящему времени не изучено программное взаимодействие нескольких интеллектуальных IoT вискозиметров на базе технологий промышленного интернета вещей.

Известные к настоящему времени результаты исследований контроля вязкости пищевых масс, в основном, используют лабораторные автоматические приборы с ручным отбором проб (Благовещенский, 2018; Xiaohong, 2002; Thirawong et al., 2008). Существующие системы автоматического измерения вязкости АКВ EASY являются также лабораторными автоматическими аппаратами и предназначены для измерения в лабораторных условиях ньютоновских жидкостей, таких как сырая нефть масла, смазки, дизельное топливо, гидравлические масла и нефтепродукты (Dhrisyal et al., 2023; Балыхин и соавт., 2017а; Балыхин и соавт., 2019). Аппарат автома-

Разработка в данном исследовании концепции создания автоматических цифровых вискозиметров, работающих в режиме реального времени на линиях производства, на базе интеллектуальных технологий промышленного интернета вещей, позволяет осуществлять сквозную передачу данных для реализации многоуровневой сетевой архитектуры, что упрощает интеграцию данных контроля вязкости в IoT системы предприятия. Это дает возможность автоматизировать контроль вязкости пищевых масс в потоке, а также увеличить надежность и эффективность существующих АСУТП пищевых предприятий за счет уменьшения человеческого фактора и автоматизированной передачи и обработки данных в существующую систему управления.

Использование технологий промышленного интернета вещей в автоматических цифровых вискозиметрах, работающих в режиме реального времени на линиях производства, являются перспективным научным направлением в совершенствовании автоматизации и управления технологическими процессами и производствами в пищевой промышленности.

Ограничения исследования

Поскольку одним из недостатков существующего автоматического вискозиметра является низкая скорость обработки информации внутри датчика, были рассмотрены и проанализированы существующие инструментальные методы и средства. Обзор и анализ полученных в данном исследовании результатов показал, что для реализации быстрого действия обработки информации внутри датчика перспективно использование операционной системы реального времени FreeRTOS, для разработки программного обеспечения — SDK аппаратной архитектуры RP2040. В качестве среды разработки на языке программирования C актуально использовать ПО Visual Studio Code.

В дальнейшем планируется реализовать программную прошивку для IoT автоматического ротационного вискозиметра и произвести тестирование работы датчика вязкости по стабильности передачи данных и синхронизации времени. Планируется также произвести описание IoT вискозиметра в стандарте AML.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования было выявлено, что использование новой высокоэффективной интеллектуальной технологии интернета вещей в пищевой промышленности дает возможность: автоматизировать контроль вязкости пищевых масс в потоке в процессе производства, сохранять в памяти прибора полученные вискозиметром данные контроля вязкости, минимизировать время обработки данных и их передачи, выполнить интеграцию предлагаемого ротационного вискозиметра в современные IoT конвейерные производства на пищевых предприятиях.

Основные достижения включают разработку аппаратно-программной архитектуры IoT автоматических ротационных вискозиметров, которая позволяет осуществить сквозную передачу данных для реализации многоуровневой сетевой архитектуры. Это позволяет увеличить надежность существующих автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) пищевых предприятий за счет уменьшения человеческого фактора и автоматизированной передачи и обработки данных в существующую систему управления.

В работе впервые предложена IoT концепция разработки автоматических ротационных вискозиметров на базе технологий промышленного интернета вещей, разработаны схемы интеграции нескольких вискозиметров в современные промышленные системы пищевых предприятий, построенные на базе технологии промышленного интернета вещей. Для более глубокого понимания влияния интеллектуальной технологии интернета вещей на качество производства пищевых продуктов необходимы дальнейшие исследования.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Сергей Андреевич Рылов: концептуализация; руководство исследованием; создание статьи и ее редактирование.

Игорь Владимирович Кротов: проведение экспериментов и сбор данных доказательств.

Маргарита Михайловна Благовещенская: формулирование идеи; формулирование исследовательских целей и задач.

Владислав Германович Благовещенский: разработка методологии исследования; создание модели исследования.

Иван Германович Благовещенский: разработка программного обеспечения реализация компьютерного кода и вспомогательных алгоритмов; тестирование существующих компонентов кода.

Александр Евгеньевич Яблоков: применение статистических, математических или других формальных методов для анализа и синтеза исследовательских данных.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Sergey A. Rylov: conceptualization; supervision; project administration; writing-review and editing.

Igor V. Krotov: investigation; validation

Margarita M. Blagoveshchenskaya: conceptualization.

Vladislav G. Blagoveshchensky: methodology; conceptualization.

Ivan G. Blagoveshchensky: software; implementation of computer code and auxiliary algorithms; testing of existing code component.

Alexander E. Yablokov: formal analysis

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Азаров, Б.М., & Арет, В.А. (1978). Инженерная реология пищевых производств. М.: МТИПП.
- Azarov, B.M., & Aret, V.A. (1978). *Engineering rheology of food production*. Moscow: MTIPP. (In Russ.)
- Балыхин, М.Г., Благовещенский, И.Г., Назойкин, Е.А., & Благовещенский, В.Г. (2019). Адаптивная система управления с идентификатором нестационарными технологическими процессами в отраслях пищевой промышленности. *Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности: материалы научно-практической конференции с международным участием* (с. 32–39). М.: МГУПП.
- Balykhin, M.G., Blagoveshchensky, I.G., Nazoikin, E.A., & Blagoveshchensky, V.G. (2019). Adaptive control system with an identifier for non-stationary technological processes in the food industry. *Intelligent systems and technologies in the food industry: Materials of the scientific and practical conference with international participation* (с. 32–39). Moscow: MGUPP. (In Russ.)
- Балыхин, М.Г., Борзов, А.Б., & Благовещенский, И.Г. (2017а). Архитектура и основная концепция создания интеллектуальной экспертной системы контроля качества пищевой продукции. *Пищевая промышленность*, (11), 60–63.
- Balykhin, M.G., Borzov, A.B., & Blagoveshchensky, I.G. (2017а). Architecture and basic concept of creating an intelligent expert system for quality control of food products. *Food Industry*, (11), 60–63. (In Russ.)
- Балыхин, М.Г., Борзов, А.Б., & Благовещенский, И.Г. (2017б). *Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий*. М.: Изд-во Франтера.
- Balykhin, M.G., Borzov, A.B., & Blagoveshchensky, I.G. (2017б). *Methodological foundations for creating expert systems for monitoring and forecasting the quality of food products using intelligent technologies*. М.: Frantera Publishing House. (In Russ.)
- Благовещенский, В.Г. (2024). *Методологические основы автоматизации контроля органолептических показателей качества кондитерской продукции и создание на их базе интеллектуальных систем управления*. Курск. Blagoveshchensky, V.G. (2024). *Methodological foundations for automation of control of organoleptic quality indicators of confectionery products and creation of intelligent control systems on their basis*. Kursk. (In Russ.)
- Благовещенский, В.Г. (2020). Интеллектуальный анализ данных для систем поддержки принятия решений диагностики процессов производства пищевой продукции. В сборнике: *Сборник научных статей II международной научно-практической конференции «Цифровизация агропромышленного комплекса»* (Том I, с. 105–110). Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ».
- Blagoveshchensky, V.G. (2020). Intelligent data analysis for decision support systems for diagnostics of food production processes. In *Collection of scientific articles of the II international scientific and practical conference «Digitalization of the agro-industrial complex»* (Vol. I, pp. 105–110). Tambov: Publishing Center of FSBEI HE «TSTU». (In Russ.)
- Благовещенский, В.Г., & Благовещенский, И.Г. (2022). *Интеллектуальная автоматизированная система управления качеством халвы с использованием гибридных методов и технологий*. Курск. Blagoveshchensky, V.G., & Blagoveshchensky, I.G. (2022). *Intelligent automated quality control system for halva using hybrid methods and technologies*. Kursk. (In Russ.)
- Благовещенский, В.Г., Благовещенский, И.Г., Головин, В.В., & Аднодворцев, А.М. (2022). Интеллектуальная оптимизация производства на основе использования инновационных продуктов и технологий. В сборнике: *Информатизация и автоматизация в пищевой промышленности. Сборник научных докладов Всероссийской научно-технической конференции* (с. 140–144). Курск. Blagoveshchensky, V.G., Blagoveshchensky, I.G., Golovin, V.V., & Adnodvortsev, A.M. (2022). Intelligent optimization of production based on the use of innovative products and technologies. In *Informatization and automation in the food industry. Collection of scientific reports of the All-Russian scientific and technical conference* (pp. 140–144). Kursk. (In Russ.)
- Благовещенский, В.Г., Краснов, А.Е., Баженов, Е.И., Благовещенская, М.М., & Мокрушин, С.А. (2021). Применение нейросетевых технологий для управления качеством кондитерских изделий в процессе производства. *Системы управления и информационные технологии*, 3(85), 37–41.

- Blagoveshchensky, V.G., Krasnov, A.E., Bazhenov, E.I., Blagoveshchenskaya, M.M., & Mokrushin, S.A. (2021). Application of neural network technologies for quality management of confectionery products in the production process. *Control Systems and Information Technologies*, 3(85), 37–41. (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г. (2018). Автоматизация контроля в режиме онлайн качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции пищевой промышленности с использованием системы компьютерного зрения. В сборнике: *Автоматизация и управление технологическими и бизнес-процессами в пищевой промышленности. Материалы научно-практической конференции с международным участием* (с. 14–17). Москва: Издательство Франтера.
- Blagoveshchensky, I.G. (2018). Automation of online quality control of raw materials, semi-finished products, and finished products of the food industry using a computer vision system. In *Automation and management of technological and business processes in the food industry. Proceedings of the scientific and practical conference with international participation* (pp. 14–17). Moscow: Frantera Publishing House. (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г. (2018). *Методологические основы создания экспертных систем контроля и прогнозирования качества пищевой продукции с использованием интеллектуальных технологий* [Диссертация на соискание ученой степени д. техн. н.]. Москва: МГУПП.
- Blagoveshchensky, I.G. (2018). *Methodological foundations for the creation of expert systems for monitoring and forecasting the quality of food products using intelligent technologies* [Doctoral dissertation]. Moscow: MGUPP. (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г. (2017). Разработка ситуационной модели технологических процессов производства помадных конфет. *Кондитерское производство*, (3), 45–49.
- Blagoveshchensky, I.G. (2017). Development of a situational model of technological processes for the production of fondant candies. *Confectionery Production*, (3), 45–49. (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г. (2018). Теоретические основы использования системы технического зрения в системе автоматического управления технологическими процессами. В *Планировании и обеспечении подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности и медицины* (с. 165–172). Москва: Издательство Франтера.
- Blagoveshchensky, I. G. (2018). Theoretical foundations of using a machine vision system in an automatic process control system. In *Planning and ensuring training and retraining of personnel for the food industry and medicine* (pp. 165–172). Moscow: Frantera Publishing House. (In Russ.)
- Благовещенский, И.Г., Благовещенский, В.Г., Мокрушин, С.А., Игольников, А.О., & Благовещенская, М.М. (2023). Применение WEB-технологий для создания автоматизированных систем мониторинга производства пищевых продуктов. *Роговские чтения: Материалы научно-практической конференции с международным участием* (с. 217–227). Курск: Университетская книга.
- Kuchumov, A.V., Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Blagoveshchenskaya, M.M., Rogovskie чтения: Материалы научно-практической конференции с международным участием (с. 217–227). Курск: Университетская книга.
- Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Mokrushin, S. A., Igolnikov, A. O., & Blagoveshchenskaya, M.M. (2023). Application of WEB technologies for creating automated systems for monitoring food production. In *Rogovskie Cheniya: Proceedings of a scientific and practical conference with international participation* (pp. 121–125). Kursk: University Book. (In Russ.)
- Горбатов, А. В., Косой, В. Д., & Горбатов, А. В. (1981). Реологические методы и приборы для контроля процессов приготовления колбасных фаршей. *Труды XXVI Европейского конгресса научных работников мясной промышленности*, 1, 265–289.
- Gorbatov, A. V., Kosoy, V. D., & Gorbatov, A. V. (1981). Rheological methods and devices for monitoring the processes of preparation of sausage mince. *Proceedings of the XXVI European Congress of Meat Industry Scientists*, 1, 265–289. (In Russ.)
- Доня, Д. В. (2005). *Разработка и исследование реометров для контроля процесса производства сыров* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук]. Кемерово.
- Donya, D. V. (2005). *Development and study of rheometers for monitoring the cheese production process* [Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. Kemerovo. (In Russ.)
- Евсин, М. Г. (2023). *Методика оценки реологических и триботехнических свойств пластичных смазок* [Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук]. Санкт-Петербург.
- Evsin, M. G. (2023). *Methodology for assessing the rheological and tribotechnical properties of plastic lubricants* [Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. St. Petersburg. (In Russ.)
- Кротов, И. В., Благовещенский, В. Г., Благовещенская, М. М., & Мокрушин, С. А. (2023). Повышение эффективности процесса контроля вязкости пищевых масс с использованием программируемых технических средств. В *Интеллектуальные автоматизированные управляющие системы в биотехнологических процессах* (с. 190–196). Москва: Издательство Франтера.
- Krotov, I. V., Blagoveshchensky, V. G., Blagoveshchenskaya, M. M., & Mokrushin, S. A. (2023). Improving the efficiency of the process of controlling the viscosity of food masses using programmable technical means. In *Intelligent automated control systems in biotechnological processes* (pp. 190–196). Moscow: Frantera Publishing House. (In Russ.)
- Кучумов, А. В., Благовещенский, И. Г., Благовещенский, В. Г., Благовещенская, М. М., Зуева, Ю. В., & Рычков, Д. Ф. (2023). Использование в производственном контроле качества пищевой продукции компьютерного зрения. В *Роговские чтения: Материалы научно-практической конференции с международным участием* (с. 217–227). Курск: Университетская книга.
- Kuchumov, A.V., Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Blagoveshchenskaya, M.M.,

- Zueva, Yu. V., & Rychkov, D. F. (2023). Using computer vision in industrial quality control of food products. In *Rogovskie cheniya: Proceedings of a scientific and practical conference with international participation* (pp. 217–227). Kursk: University Book. (In Russ.)
- Кучумов, А. В., Благовещенский, И. Г., Благовещенский, В. Г., Осташов, П. И., & Благовещенская, М. М. (2023). Цифровизация производства пищевых продуктов. *Роговские чтения* (с. 262–270). Курск: Университетская книга.
- Kuchumov, A.V., Blagoveshchensky, I.G., Blagoveshchensky, V.G., Ostashov, P.I., & Blagoveshchenskaya, M.M. (2023). Digitalization of food production. *Rogovskie cheniya* (pp. 262–270). Kursk: University Book. (In Russ.)
- Мачихин, Ю. А., & Мачихин, С. А. (1981). *Инженерная реология пищевых материалов*. Москва: Легкая и пищевая промышленность.
- Machikhin, Yu. A., & Machikhin, S. A. (1981). *Engineering rheology of food materials*. Moscow: Light and Food Industry. (In Russ.)
- Политов, Е. Н. (2003). Проблемы развития методов измерения реологических параметров однофазных сред. В *Проблемы истории науки и техники: Сборник научных статей* (с. 54–60). Курск: Государственный технический университет.
- Politov, E. N. (2003). Problems of development of methods for measuring rheological parameters of single-phase media. In *Problems of the history of science and technology: Collection of scientific articles* (pp. 54–60). Kursk: State Technical University. (In Russ.)
- Пирогов, А. Н. (2013). *Разработка научно обоснованных методов и устройств реометрического мониторинга процессов структурообразования в молочных продуктах* [Диссертации доктора технических наук]. Кемерово.
- Pirogov, A. N. (2013). *Development of scientifically based methods and devices for rheometric monitoring of structure formation processes in dairy products* [Dissertation of a Doctor of Technical Sciences]. Kemerovo. (In Russ.)
- Рылов, С. А. (2023). IoT аппаратная архитектура распределённых систем управления непрерывными промышленными производствами и агрокомплексами. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*, 70(1), 105–113. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113>
- Rylov, S. A. (2023). IoT hardware architecture of distributed control systems for continuous industrial production and agricultural complexes. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*, 70(1), 105–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113>
- Рылов, С. А., Богомольная, Г. В., Сухатерин, А. Б., & Петухов, А. М. (2022). Архитектура цифровых двойников промышленного интернета вещей. *Промышленные АСУ и контроллеры*, (6), 29–35. <https://doi.org/10.25791/asu.6.2022.1370>
- Rylov, S. A., Bogomolnaya, G. V., Sukhaterin, A. B., & Petukhov, A. M. (2022). Architecture of digital twins of the industrial Internet of Things. *Industrial ACS and Controllers*, (6), 29–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.25791/asu.6.2022.1370>
- Alamri, M.S., Abdellatif, A.M., & Shahzad, H. (2012). Effect of okra gum on the pasting, thermal, and viscous properties of rice and sorghum starches. *Carbohydrate Polymers*, 89(1), 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.02.071>
- Averiyanihin, A.E., Andronov, D.O., Melikyan, S.A., & Skalchenkov, I.I. (2021). Experimental study of speed parameters and resource intensity of programming languages for embedded systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 229, 17–33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77445-5_3
- Brock, J., Nogueira, M.R., Zakrzewski, C., Corazza, F. de C., Corazza, M.L., & de Oliveira, J.V. (2008). Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais [Experimental determination of the viscosity and thermal conductivity of vegetable oils]. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(3), 564–570. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000300010>
- Ding, K., & Fan, L. (2022). AML-based web-twin visualization integration framework for DT-enabled and IIoT-driven Manufacturing system under I4.0 workshop. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 479–496. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.014>
- Dhrisya, S., Mahadevan, V., Dinesh Karthick, V., Mohammed Ashik, S., & Dhanrajprabu, V. (2023). Title of the article. *International Journal of Innovative Research in Engineering*, 4(3), 402–405. <https://doi.org/10.59256/ijire.20230403109>
- Haidekker, M. A., Amy, G. T., Thomas, B., Hazel, Y. S., John, A. F., Emmanuel, T., & Marcos, I. (2002). A novel approach to blood plasma viscosity measurement using fluorescent molecular rotors. *AJP-Heart Circ Physiol*, 282(5), 1609–1614. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00712.2001>
- Kuo, F.-J., Sheng, C.-T., & Ting, C.-H. (2008). Evaluation of ultrasonic propagation to measure sugar content and viscosity of reconstituted orange juice. *Journal of Food Engineering*, 86(1), 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.016>
- Sahasrabudheb, S.N., Rodriguez-Martinez, V., O'Meara, M., & Brian, E.F. (2017). Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures: Measurement and modeling. *International Journal of Food Properties*, 20(2), 1965–1981. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1360905>
- Jadaun, S., Singh, R.K., Kumar, R., & Agarwal, K.K. (2023). Analysis of cross platform application development over multiple devices using flutter & dart. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 12(1), 33–38.
- Thirawong, N., Kennedy, R.A., & Sriamornsak, P. (2008). Viscometric study of pectin-mucin interaction and its mucoadhesive bond strength. *Carbohydrate Polymers*, 71(2), 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.026>
- Xiaohong, S., & BeMiller, J.N. (2002). Effect of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting. *Carbohydrate Polymers*, 50(1), 7–18. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00369-1)