

УДК 664:004.89

**Съедугина Анастасия Сергеевна**, аспирант,  
ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова»,  
г. Москва

**Уткина Александра Сергеевна**,  
старший преподаватель,  
ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова»,  
г. Москва

**Карагодин Василий Петрович**,  
профессор, доктор биологических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова»,  
г. Москва

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ С ПОМОЩЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

**Аннотация:** в научной статье описаны методы создания и применения цифровых моделей производственных процессов. Основное внимание уделено разработке алгоритмов моделирования технологических операций, а также анализу их влияния на качество конечного продукта. Исследованы возможности использования цифровых двойников для повышения эффективности управления производственными процессами и снижения затрат.

**Ключевые слова:** цифровые двойники, переработка пищевого сырья, производственные процессы, пищевая промышленность, моделирование.

Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию реального объекта, совокупности объектов либо процессов [5]. Этот сложный программно-технический комплекс формируется на базе различных типов данных. Он не только аккумулирует информацию, полученную на этапах проектирования и производства, но и непрерывно собирает и обрабатывает данные на протяжении всего срока службы физического аналога, включая использование множества датчиков Интернета вещей (IoT) [5]. Цифровой двойник позволяет по минимальным ключевым параметрам воспроизвести все остальные показатели объекта. Несколько цифровых двойников можно объединить в одну систему. Опросы, проводимые аналитиками Gartner, показывают, что в 13% организаций, реализующих проекты Интернета вещей, уже применяются цифровые двойники, а в 62% либо начинают их создание, либо планируют сделать это [5]. По прогнозам экспертов, через пять лет рынок таких продуктов, как цифровые двойники, достигнет 16 млрд. долл. США [5]. По сути, цифровой двойник можно определить как развивающийся цифровой профиль исторического и текущего поведения физического объекта или процесса, который помогает оптимизировать эффективность бизнеса.

Для создания и внедрения цифровых моделей производственных процессов в пищевой отрасли используются разнообразные методы, направленные на повышение эффективности переработки пищевого сырья. На начальном этапе осуществляется сбор информации обо всех аспектах производственного процесса, начиная от характеристик исходного сырья до параметров конечной продукции. Для этого применяются датчики IoT, системы мониторинга качества и другие современные технологии. Далее создаются цифровые модели, имитирующие реальные процессы переработки. Эти модели учитывают множество факторов,



таких как температурные режимы, влажность, скорость обработки и так далее. Модели позволяют прогнозировать поведение систем при изменении условий эксплуатации. Используя полученные данные и результаты моделирования, проводится глубокий анализ текущих процессов. Выявляются узкие места, потенциальные риски и возможности для улучшения. В результате разрабатываются рекомендации по оптимизации, такие как изменение режимов работы оборудования, улучшение логистики или внедрение новых технологий. Перед внедрением изменений проводятся имитационные тесты, позволяющие оценить эффективность предложенных решений без риска для реальных производственных линий. Это снижает вероятность ошибок и минимизирует затраты на корректировку. После внедрения улучшений продолжается мониторинг производственных показателей. Полученная информация используется для дальнейшей адаптации и совершенствования процессов [1].

Рассмотрим один из возможных алгоритмов моделирования технологических операций. Допустим, что алгоритм направлен на моделирование воздействия механических нагрузок на сырье и оборудование. Основная цель – минимизировать повреждения и деформации сырья, сохраняя его качественные характеристики.

Данный алгоритм можно разделить на несколько этапов:

- сбор данных о типе и интенсивности механических воздействий (например, давление, вибрации);
- разработка физической модели, описывающей взаимодействие материалов под воздействием этих сил;
- использование методов конечных элементов (МКЭ) для расчета деформаций и напряжений в материале;
- оценка возможных повреждений и разработка рекомендаций по изменению конструкции оборудования или параметров процесса.

Пример кода (язык программирования Python):

```
import pyvista as pv
from pyvistaqt import BackgroundPlotter
mesh = pv.read("model.stl")
plotter = BackgroundPlotter()
plotter.add_mesh(mesh, show_edges=True, color="w", opacity=0.75)
plotter.show_grid()
plotter.enable_anti_aliasing()
plotter.camera_position = [(10, 10, -15), (0, 0, 0), (0, 0, 1)].
plotter.view_isometric()
plotter.save_graphic('mechanical_analysis.png')
```

Также возможно составление алгоритмов моделирования температурных режимов, моделирования химических реакций и так далее. После разработки и реализации вышеуказанных алгоритмов необходимо провести детальный анализ их влияния на качество конечного продукта [3]. Целесообразен выбор ключевых параметров, характеризующих качество продукта (вкус, текстура, цвет, срок хранения и др.). Далее – исследование корреляции между параметрами технологического процесса и показателями качества продукта. Например, можно использовать регрессионный анализ для выявления зависимости между температурой обработки и вкусом продукта. Далее актуальна оценка того, насколько чувствительны показатели качества к изменениям параметров процесса, это поможет определить, какие параметры являются наиболее критичными и требуют особого внимания. На основании проведенного анализа можно разработать рекомендации по улучшению технологического процесса. Комбинация моделирования и анализа позволит существенно улучшить качество конечного продукта, сократить потери и повысить общую эффективность производственного процесса.



Цифровые двойники играют ключевую роль в повышении эффективности управления производственными процессами и снижении затрат при переработке пищевого сырья. Они позволяют моделировать различные сценарии работы оборудования и технологических цепочек, что дает возможность находить наиболее эффективные способы переработки сырья. Это приводит к уменьшению времени простоя, увеличению производительности и снижению количества отходов. Также использование цифровых двойников позволяет отслеживать состояние оборудования в реальном времени и прогнозировать необходимость технического обслуживания, что предотвращает внеплановые остановки производства и уменьшает риск поломок, что ведет к значительному снижению затрат на ремонт и эксплуатацию. Более того, цифровой двойник может анализировать данные о качестве сырья и процессе его переработки, выявляя любые отклонения от стандартов, данное направление способствует предотвращению выпуска некачественного продукта и снижению затрат, связанных с браком. Моделирование потребления электроэнергии, воды и других ресурсов с помощью цифровых двойников дает возможность оптимально распределять ресурсы, избегая излишнего расхода и тем самым снижая операционные затраты. Цифровым двойникам присуща гибкость, позволяющая быстро адаптироваться к изменяющимся условиям рынка, требованиям клиентов и законодательным нормам, что обеспечивает оперативность в принятии управленческих решений и снижение рисков, связанных с изменениями внешней среды.

Примером оптимизации энергозатрат при переработке пищевого сырья можно выступать следующее: на одном из крупных молочных заводов была внедрена система цифрового двойника для мониторинга и анализа энергопотребления. Цифровая модель позволила выявить участки производственного процесса, где происходило избыточное потребление энергии. Путем моделирования различных сценариев удалось найти более энергоэффективные режимы работы оборудования, что привело к сокращению расходов на электроэнергию на 12% [2].

Для предотвращения брака продукции на мясоперерабатывающем предприятии использовали цифровой двойник для контроля процесса термической обработки полуфабрикатов. Модель помогла обнаружить отклонения в температурных режимах, которые могли привести к ухудшению качества продукции. Благодаря своевременной коррекции параметров обработки удалось значительно уменьшить количество бракованных партий, снизив издержки на утилизацию и повторную переработку [4].

Статья доказала высокую эффективность использования цифровых двойников в оптимизации переработки пищевого сырья. Их внедрение позволяет сократить время простоя, увеличить производительность, снизить отходы и контролировать качество продукции. Прогнозирование технического обслуживания предотвращает внеплановые остановки, а оптимизация маршрутов транспортировки и ресурсопотребления приводит к снижению затрат. Гибкость цифровых двойников облегчает адаптацию к внешним изменениям.

*Список литературы:*

1. Беседин, А. Ю. внедрение цифровых двойников в пищевую промышленность / А. Ю. Беседин // Студенческий вестник. – 2024. – № 27-2 (313). – С. 56-57.
2. Босая, И. И. Цифровые двойники на предприятиях пищевой промышленности / И. И. Босая, О. В. Титова // Сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 10 февраля 2024 года. – Уфа: ООО «Аэтерна», 2024. – С. 79-81.
3. Глинянов, С. В. Интернет вещей и цифровые двойники в пищевой промышленности: преимущества и вызовы для потребителей и производителей / С. В. Глинянов, М. В. Глинянов, Ю. С. Капитонова // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2023. – Т. 13, № 4-1. – С. 843-852.



4. Пантелеев, И. А. Цифровые двойники в пищевой промышленности: новый рубеж оптимизации и устойчивого развития / И. А. Пантелеев // Финансовые рынки и банки. – 2024. – № 8. – С. 201-203.

5. Официальный сайт RB.RU [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rb.ru/longread/digital-twin/> (дата обращения: 14.11.2024).

