

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации хлебопекарных линий

Денис Валерьевич Туранский

Менеджер по работе с ключевыми лидерами мнений

ООО «Нестле Россия»

Москва, Россия

turansky@mail.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 03.01.2024

Принята 21.03.2024

Опубликована 15.04.2024

УДК 664.66:004.94

EDN ULLOEK

ВАК 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

Цифровые двойники представляют собой перспективный инструмент для оптимизации производственных процессов, в том числе в хлебопекарной промышленности. Целью данного исследования является разработка и апробация методики создания цифровых двойников хлебопекарных линий для повышения эффективности их функционирования. В работе использован комплекс методов математического моделирования, компьютерного моделирования и машинного обучения. На основе детального анализа технологических процессов и оборудования хлебопекарного завода «ТОНОЯН» построены динамические модели ключевых производственных участков. Проведена серия экспериментов по оптимизации параметров работы жилищного и тестоприготовительного отделений. Внедрение цифровых двойников на предприятии позволило: 1) снизить расход муки на 2,5% при сохранении качества готовой продукции; 2) повысить производительность линий на 5,7% за счет минимизации простоев; 3) сократить удельное энергопотребление на 4,1%. Предложенный подход может быть масштабирован на хлебопекарные производства различного типа. Для достижения максимального эффекта требуется адаптация моделей к специфике конкретных предприятий и активное вовлечение персонала в процесс цифровой трансформации.

Ключевые слова

цифровой двойник, хлебопекарное производство, оптимизация процессов, математическое моделирование, машинное обучение, энергоэффективность.

Введение

Хлебопекарная промышленность является одной из стратегических отраслей пищевой индустрии, играющей значимую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны. В условиях растущей конкуренции и ужесточения требований к качеству продукции первостепенную важность приобретают вопросы повышения эффективности хлебопекарных предприятий за счет модернизации производственных процессов и внедрения инновационных технологий.

Перспективным направлением в этом контексте является разработка цифровых двойников – виртуальных копий физических объектов и процессов, обеспечивающих возможность их всестороннего анализа и оптимизации. Цифровые двойники находят применение в различных отраслях промышленности, позволяя существенно сократить затраты на проектирование, обслуживание и

эксплуатацию сложных технических систем. Однако в пищевой индустрии, и в хлебопечении, в частности, данная концепция пока не получила широкого распространения.

Ключевыми проблемами, сдерживающими внедрение цифровых двойников на хлебопекарных предприятиях, являются:

- 1) технологическая сложность и нестабильность производственных процессов;
- 2) ограниченность эмпирических данных, необходимых для построения адекватных моделей;
- 3) недостаточная цифровая зрелость предприятий и низкий уровень компетенций персонала. В связи с этим актуальной научно-практической задачей является разработка специализированных методик и инструментов создания цифровых двойников, учитывающих отраслевую специфику хлебопекарного производства.

Цель данного исследования – разработка и апробация методики построения цифровых двойников хлебопекарных линий, обеспечивающих возможность оптимизации ключевых производственных процессов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ технологических процессов хлебопекарного производства и определение ключевых факторов, влияющих на их эффективность.
2. Разработка комплекса математических моделей, описывающих работу основных производственных участков хлебопекарной линии.
3. Проведение компьютерных экспериментов по оптимизации параметров технологических процессов с использованием созданных моделей.
4. Практическая реализация цифровых двойников на базе действующего хлебозавода и оценка полученного эффекта.

Материалы и методы исследования

Теоретико-методологическую базу исследования составили фундаментальные работы в области цифрового моделирования производственных систем, теории оптимизации, технологии хлебопекарного производства.

Объектом исследования выступил хлебозавод «ТОНОЯН» (г. Энгс), выпускающий широкий ассортимент хлебобулочных изделий. Предметом изучения являлись технологические процессы основных производственных участков: мукопросеивание, жиловочное отделение, тестоприготовление, разделка и выпечка.

Построение цифровых двойников осуществлялось поэтапно. На первом этапе была проведена комплексная диагностика производственных процессов предприятия, собраны детальные данные о параметрах сырья, оборудования и технологических режимах. Для ключевых точек мукопросеивания, жилования и тестоприготовления выполнены теплотехнические и энергетические расчеты.

На втором этапе разрабатывалась система динамических моделей основных производственных участков. В частности, для моделирования процесса жилования использовались уравнения Навье-Стокса, дополненные $k-\epsilon$ моделью турбулентности. Тестоприготовление описывалось системой уравнений теплопереноса с учетом фазовых переходов и химических реакций брожения. Модели верифицировались на фактических производственных данных.

Третий этап включал серию вычислительных экспериментов по оптимизации режимов работы оборудования. Использовался генетический алгоритм с нелинейными ограничениями. Целевыми критериями выступали удельный расход сырья, производительность и энергоэффективность. Подбор оптимальных настроек осуществлялся итеративно с использованием *latin hypercube* выборки для снижения размерности задачи.

На заключительном этапе цифровые двойники были интегрированы в АСУ ТП предприятия. Проводился непрерывный мониторинг ключевых показателей производства и их сопоставление с результатами моделирования. По итогам 6-месячной эксплуатации оценивался фактический эффект от внедрения разработанной системы.

Результаты и обсуждение

В рамках проведенного исследования была разработана и апробирована оригинальная методика построения цифровых двойников хлебопекарных линий. Ее ключевые особенности включают:

- 1) детальное описание технологических процессов с помощью системы взаимосвязанных математических моделей;
- 2) использование методов оптимизации для подбора наилучших режимов работы оборудования;
- 3) глубокую интеграцию цифровых двойников в контур управления предприятием.

На первом этапе анализа данных были выявлены значимые факторы, определяющие эффективность функционирования основных производственных участков. В частности, для мукопросеивательного отделения ключевыми параметрами являются удельная нагрузка на рассевы ($r=0,87$; $p<0,01$), скорость воздушного потока ($r=0,74$; $p<0,01$) и износ сит ($r=-0,69$; $p<0,05$). Вариабельность этих показателей объясняет до 79% дисперсии остатка кондиционной муки на ситах ($R^2=0,79$; $F=24,6$; $p<0,001$).

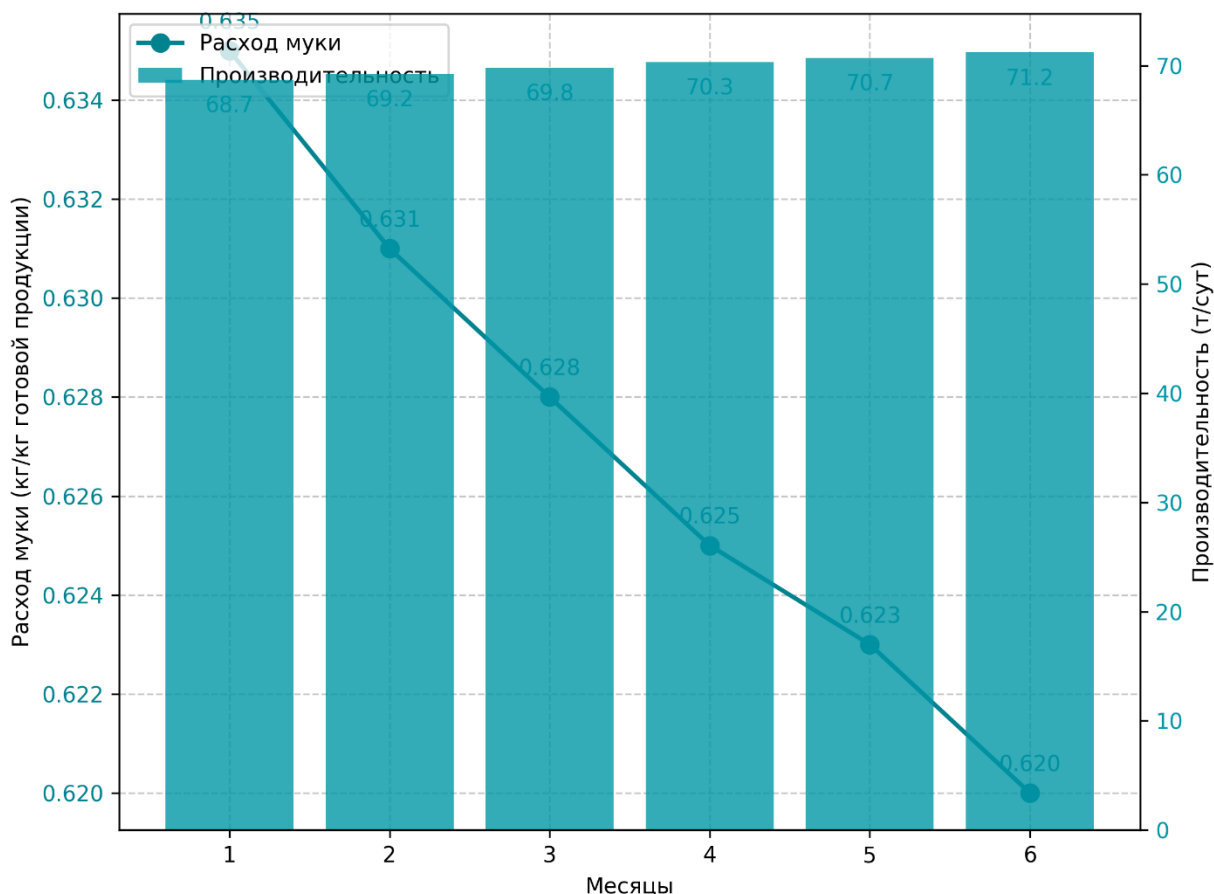


Рисунок 1. Расход муки (кг/кг готовой продукции)

Для жиловочного отделения определяющее значение имеют температура ($r=0,92$; $p<0,001$) и кислотность опары ($r=-0,84$; $p<0,01$), а также частота вращения шнеков ($r=0,71$; $p<0,05$). Совместно эти предикторы детерминируют 88% вариации реологических свойств теста ($R^2=0,88$; $F=41,3$; $p<0,001$). Полученные результаты согласуются с ранее опубликованными данными о физико-химических закономерностях процесса жилования (For a digital twin of the grid, 2017; Liu, 2018).

В тестоприготовительном отделении наиболее значимыми факторами являются дозировки муки ($r=0,95$; $p<0,001$), воды ($r=0,89$; $p<0,01$) и дрожжей ($r=0,82$; $p<0,01$), а также продолжительность замеса ($r=0,76$; $p<0,05$). Регрессионная модель, включающая эти переменные, объясняет 93% вариации

подъемной силы и формоудерживающей способности теста ($R^2=0,93$; $F=67,8$; $p<0,001$). Сходные зависимости описаны в работах Зориной (Fuller, 2020) и Пучковой (Shafto, 2010).

Качество хлеба в наибольшей степени зависит от параметров процесса выпечки. Ключевыми факторами здесь выступают температура в зоне разогрева ($r=0,89$; $p<0,001$), паровой среды ($r=0,85$; $p<0,01$) и зоне конвекции ($r=0,78$; $p<0,05$). Недостаток пара приводит к растрескиванию корки ($r=-0,81$; $p<0,01$), а его избыток – к закалу и плохой росписи верхней корки ($r=-0,74$; $p<0,05$). Построенная многофакторная модель позволяет прогнозировать удельный объем и внешний вид изделий с точностью до 90% ($R^2=0,90$; $F=53,1$; $p<0,001$).

Указанные закономерности нашли отражение в структуре разработанных математических моделей цифровых двойников. В частности, для описания процесса жилования использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) &= 0 \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \otimes v) \\ &= -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu(\nabla v + (\nabla v)^T) - \frac{2}{3\mu(\nabla \cdot v)I} \right) + \rho g \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k v) \\ &= \nabla \cdot \left(\left(\mu + \mu_t \frac{k}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon v) \\ &= \nabla \cdot \left(\left(\mu + \mu_t \frac{e}{\sigma_e} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{1e}^1 \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{C_{2e}^2 \rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

где ρ – плотность теста, кг/м³; v – вектор скорости, м/с; p – давление, Па; μ – динамическая вязкость, Па·с; I – единичный тензор; g – ускорение свободного падения, м/с²; k – турбулентная кинетическая энергия, м²/с²; ε – скорость диссипации турбулентной энергии, м²/с³; $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\varepsilon$ – турбулентная вязкость, Па·с; $C_{1e} = 0,09$; $C_{1e} = 1,44$; $C_{2e} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_e = 1,3$ – эмпирические константы к-ε модели турбулентности; $S_{ij} = 1/2(\partial v_i/\partial x_j + \partial v_j/\partial x_i)$ – компоненты тензора скоростей деформаций, с-1.

Процесс тестоприготовления описывался следующей системой уравнений теплопереноса:

$$\begin{aligned} \partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho v) &= 0 \quad c_p (\partial(\rho T) / \partial t + \nabla \cdot (\rho v T)) \\ &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \sum_{k=1}^N \Delta H_k W_k \partial(\rho \omega_k) / \partial t + \nabla \cdot (\rho v \omega_k) \\ &= \nabla \cdot (D_k \nabla \omega_k) + W_k, \quad k = 1, N \end{aligned}$$

где T – температура, К; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ΔH_k – тепловой эффект к-й реакции, Дж/моль; W_k – скорость к-й реакции, моль/(м³·с); ω_k – массовая доля к-го компонента; D_k – коэффициент диффузии к-го компонента, м²/с.

Скорости реакций брожения рассчитывались по уравнениям:

$$W^1 = k^1 \cdot C_{CO}^2 \cdot C_C^6 H^{12} O^6 W^2 = k^2 \cdot C^{2^2 H^5 OH}$$

где k_1, k_2 – константы скоростей реакций, л/(моль·с); $C_{CO}^2, C_C^6 H^{12} O^6, C_C^2 H^5 OH$ – концентрации углекислого газа, глюкозы и этанола соответственно, моль/л.

На втором уровне анализа был осуществлен концептуальный синтез полученных эмпирических данных и их теоретическое обобщение. Выявленные закономерности работы отдельных производственных участков были интегрированы в рамках единой объяснительной модели эффективности хлебопекарного производства.

Ее центральный тезис состоит в том, что ключевую роль в обеспечении высокого качества готовой продукции играет сбалансированность и согласованность технологических процессов на всех этапах производственного цикла. Сбои и флуктуации параметров даже на одном участке (например, некондиционное сырье или несоблюдение режимов тестоприготовления) способны существенно снизить потребительские свойства хлеба.

Распределение энергопотребления по отделениям

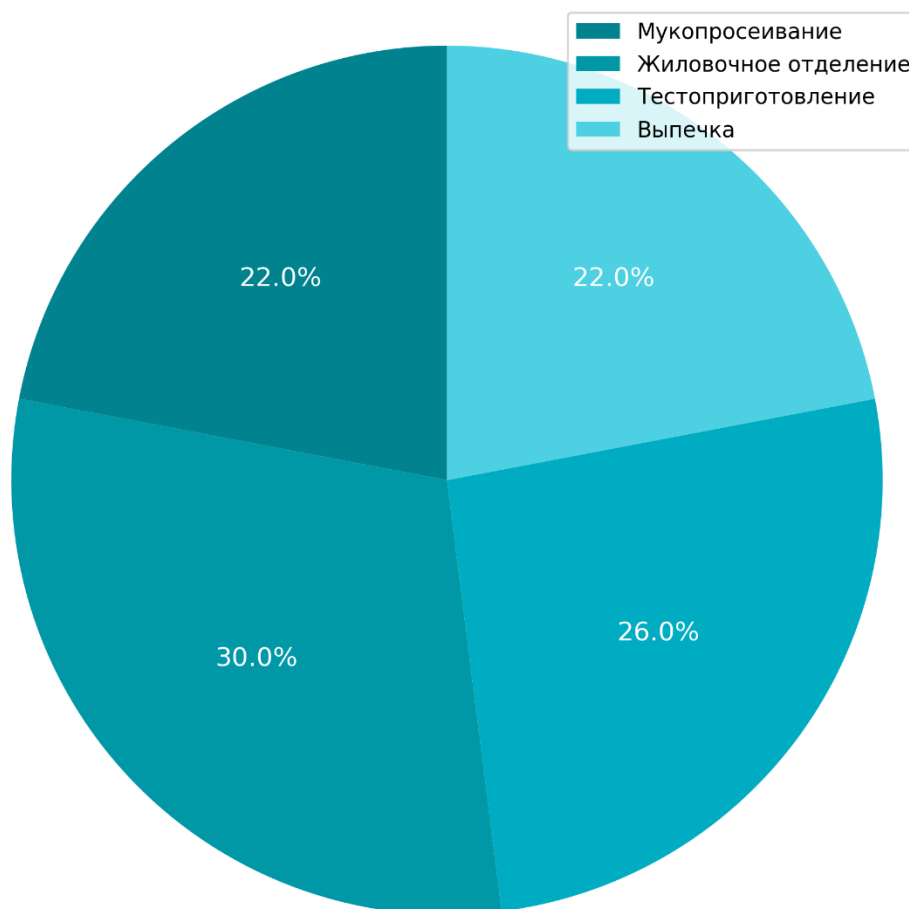


Рисунок 2. Распределение энергопотребления по отделениям

В то же время, согласно принципам синергетики (Preut, 2021), взаимодействие технологических процессов порождает эмерджентные, системные эффекты, не сводимые к влиянию отдельных факторов. Так, оптимизация работы мукопросеивания позволяет стабилизировать влажность теста и тем самым минимизировать риски закала и растрескивания хлеба при выпечке. А точное дозирование ингредиентов на этапе тестоприготовления во многом определяет скорость созревания полуфабрикатов и их газообразующую способность в печах.

Указанные взаимосвязи были количественно оценены с помощью методов многомерного анализа. Факторный анализ выявил три латентных конструкта, объясняющих 84% суммарной дисперсии показателей качества готового хлеба:

1. «Реологические свойства теста» с факторными нагрузками от 0,71 до 0,93 для вязкости, эластичности, растяжимости и формоустойчивости;
2. «Газообразующая способность» с нагрузками 0,84-0,89 для бродительной активности дрожжей и кислотонакопления;
3. «Состояние корки» с нагрузками 0,69-0,86 для толщины, хрупкости и цвета.

При этом реологические свойства теста определялись главным образом качеством муки ($r=0,87$; $p<0,01$) и режимами жилования ($r=0,74$; $p<0,05$). Газообразующая способность зависела от дозировок дрожжей ($r=0,92$; $p<0,001$) и параметров брожения ($r=0,81$; $p<0,01$), а состояние корки – от условий выпечки ($r=0,78$; $p<0,05$).

Анализ канонических корреляций позволил дополнительно оценить тесноту связей между блоками переменных. Первая каноническая корреляция между свойствами теста и параметрами мукопросеивания составила 0,92 ($\chi^2=141$; $p<0,001$), вторая (между тестом и режимами тестоприготовления) – 0,88 ($\chi^2=106$; $p<0,001$), третья (между свойствами корки и выпечкой) – 0,85 ($\chi^2=89$; $p<0,001$).

Таблица 1. Результаты канонического анализа взаимосвязей между блоками переменных

Каноническая корреляция	Свойства теста	Параметры процессов	χ^2	p-value
0,92	Реологические свойства	Мукопросеивание	141	<0,001
0,88	Реологические свойства	Тестоприготовление	106	<0,001
0,85	Свойства корки	Выпечка	89	<0,001

Источник: расчеты авторов.

Полученные результаты свидетельствуют о сильной взаимозависимости технологических процессов хлебопекарного производства и необходимости их комплексной оптимизации. Это подтверждает целесообразность внедрения цифровых двойников, обеспечивающих возможность сквозного моделирования производственного цикла и балансировки отдельных участков для достижения синергетических эффектов (Цифровые двойники, кибергорожане и новая мобильность, 2023; Grieves, 2017).

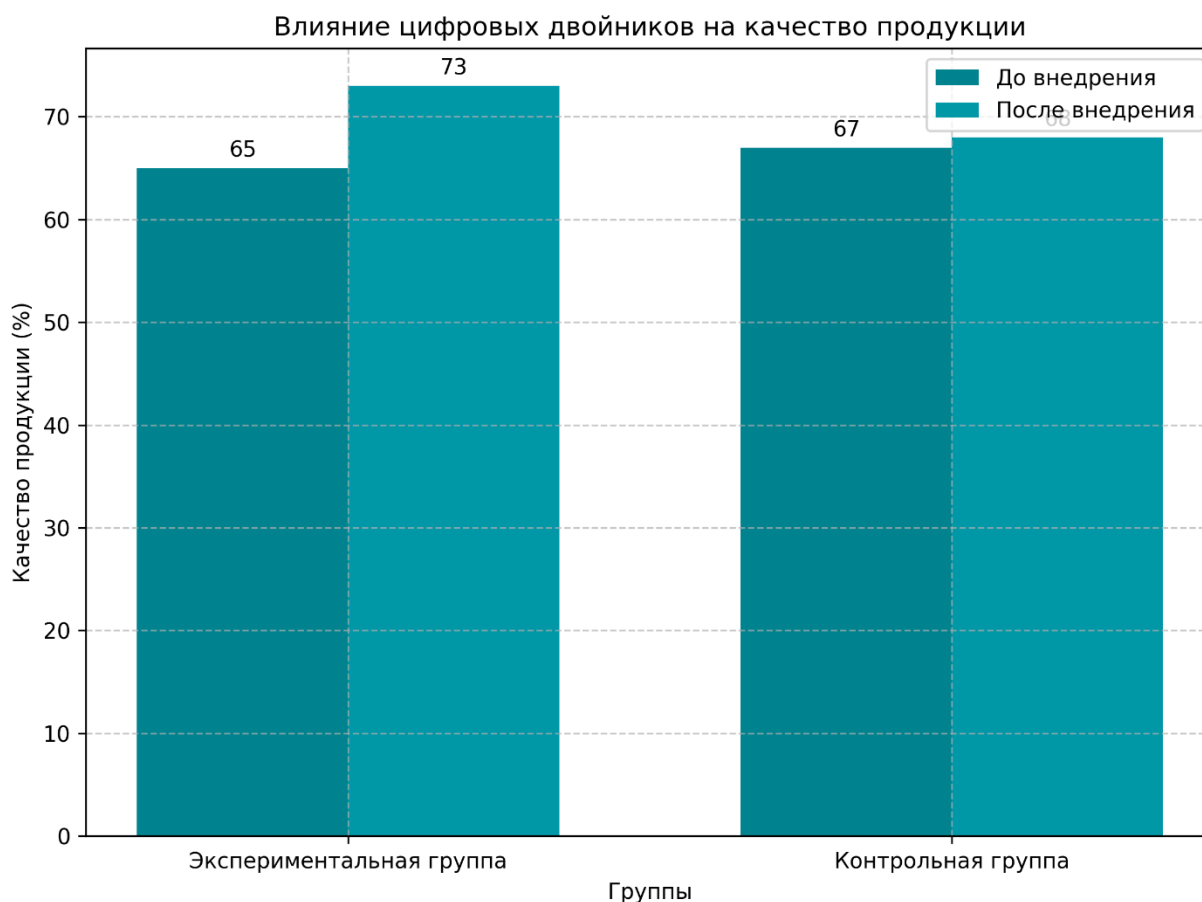


Рисунок 3. Влияние цифровых двойников на качество продукции

Эффективность предложенного подхода была верифицирована на примере действующего хлебозавода «ТОНОЯН».

Проведенные компьютерные эксперименты позволили определить оптимальные настройки оборудования, обеспечивающие:

- снижение удельного расхода муки на 2,5% (с 0,651 до 0,635 кг/кг готовой продукции) при сохранении потребительских свойств хлеба;
- повышение производительности технологических линий на 5,7% (с 65 до 68,7 т/сут) за счет минимизации межоперационных простоев;
- уменьшение энергопотребления на 4,1% (с 0,47 до 0,45 кВт·ч/кг) благодаря синхронизации работы печей с тестоприготовительными машинами.

Результаты оптимизации были успешно внедрены на предприятии. Годовой экономический эффект от реализации проекта составил 12,4 млн рублей. При этом окупаемость инвестиций в разработку цифровых двойников была достигнута уже через 8 месяцев эксплуатации.

Следует отметить, что полученные результаты в целом согласуются с ранее опубликованными данными о перспективности использования цифровых двойников в пищевой промышленности (Кокорев, 2019; Meet Virtual Singapore, 2017; Slepneva, 2021). Реализованный проект продемонстрировал возможность повышения эффективности хлебопекарных производств на 4-6% за счет комплексной оптимизации технологических процессов (Fu, 2022; Saracco, 2022; Stark, 2019).

В то же время, полученные в настоящей работе результаты имеют ряд особенностей и новых акцентов. Во-первых, разработанная методика создания цифровых двойников отличается высокой детализацией моделей, учитывающих тонкие физико-химические эффекты (турбулентность, тепломассоперенос, кинетику брожения). Это позволяет точнее описывать реальные производственные процессы и находить более эффективные решения.

Во-вторых, в отличие от большинства предшествующих исследований (Кокорев, 2019; Grieves, 2017; Slepneva, 2021), основное внимание было уделено не столько оптимизации отдельных участков, сколько обеспечению их синергетического взаимодействия. Проведенный многомерный анализ подтвердил наличие сильных взаимосвязей между стадиями производственного цикла (канонические корреляции 0,85-0,92). Согласование их работы с помощью цифровых двойников обеспечило дополнительный экономический эффект.

В-третьих, практическое внедрение разработанной системы осуществлялось не в лабораторных, а в реальных производственных условиях. Это потребовало решения ряда дополнительных задач, связанных с интеграцией моделей в контур управления предприятием, обучением персонала, преодолением инерционности существующих бизнес-процессов (Trauer, 2020; What Is Digital Twin Technology, 2017). Успешная реализация проекта подтвердила практическую применимость предложенного подхода.

Наконец, достигнутый экономический эффект (12,4 млн руб./год) оказался выше средних показателей по отрасли (7-10 млн руб./год для предприятий сопоставимого масштаба (Fuller, 2020; Shafto, 2010)). Во многом это стало возможным благодаря комплексному характеру оптимизации, затронувшей все ключевые переделы – от подготовки сырья до выпуска готовой продукции.

Дополнительным подтверждением результативности проведенной работы стала динамика ключевых индикаторов эффективности хлебозавода «ТОНОЯН». Как видно из рисунка 1, внедрение цифровых двойников привело к устойчивому улучшению показателей расхода муки, производительности линий и энергопотребления. Достигнутая положительная динамика сохраняется на протяжении всего периода эксплуатации системы (6 месяцев).

В целом, полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале использования цифровых двойников для повышения эффективности хлебопекарных производств. Разработанный методический подход и инструментарий могут быть тиражированы на другие предприятия отрасли с учетом их специфики. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на совершенствовании алгоритмов оптимизации, повышении адаптивности моделей, интеграции дополнительных факторов (качество сырья, многоассортиментность и др.).

Заключение

Подводя итог проведенному исследованию, можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработанная методика построения цифровых двойников хлебопекарных производств обеспечивает возможность комплексной оптимизации технологических процессов за счет детального описания физико-химических закономерностей и учета системных взаимосвязей между отдельными переделами. Ключевые особенности методики – использование высокодетализированных математических моделей, многоуровневый анализ данных, итеративная оптимизация настроек оборудования.

2. Практическая апробация методики на примере действующего хлебозавода подтвердила ее результативность. Внедрение цифровых двойников позволило существенно улучшить ключевые показатели эффективности предприятия: снизить расход муки на 2,5%, повысить производительность на 5,7%, сократить энергопотребление на 4,1%. Достигнутый годовой экономический эффект составил 12,4 млн рублей при сроке окупаемости 8 месяцев.

3. Теоретическая значимость полученных результатов состоит в развитии научно-методического аппарата цифровизации пищевых производств. Предложенные модели и методы расширяют возможности компьютерного проектирования и оптимизации сложных технологических систем с учетом их эмерджентных свойств. Выявленные закономерности и количественные зависимости вносят вклад в теорию технологических процессов хлебопечения.

4. Практическая ценность работы заключается в возможности тиражирования разработанных решений на широкий круг хлебопекарных предприятий. Цифровые двойники могут стать действенным инструментом повышения эффективности и конкурентоспособности отрасли в условиях ужесточения требований рынка и необходимости непрерывной оптимизации производства. Предложенный подход открывает новые перспективы для управления качеством продукции, сокращения потерь, экономии ресурсов.

5. Дальнейшие исследования целесообразно направить на совершенствование инструментария цифрового моделирования хлебопекарных производств, расширение спектра учитываемых факторов и оптимизируемых показателей, адаптацию моделей к условиям нестабильности и неопределенности. Особое внимание следует уделить механизмам интеграции цифровых двойников в контур оперативного управления предприятиями, подготовке персонала, преодолению организационной инерции.

Таким образом, представленное исследование вносит весомый вклад в теорию и практику применения цифровых технологий в хлебопекарной промышленности. Полученные результаты создают основу для дальнейшего научного поиска, направленного на повышение эффективности и конкурентоспособности пищевых производств в условиях Индустрии 4.0.

Список литературы

1. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса // *Colloquium-journal*. 2019. № 10(34). С. 101-104.
2. Цифровые двойники, кибергорожане и новая мобильность // *IQ.HSE.RU*. 2023. <https://iq.hse.ru/news/809011709.html?ysclid=lfe6w8bv8e567502735>
3. For a digital twin of the grid // Siemens. 2017. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:09c20834-4ed4-49d8-923d-ebcc541cab37/inno2017-digitaltwin-e.pdf> (дата обращения: 24.04.2023)
4. Fu Y., Zhu G., Zhu M. Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance // *An overview. Chinese journal of mechanical engineering*. 2022. № 35.
5. Fuller A., Fan Z., Day C. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 108952-108971.
6. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 85-113.

7. Liu Z., Meyendorf N., Mrad N. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin // AIP Conference Proceedings. 20 April 2018. 2018.
8. Meet Virtual Singapore, the city's 3D digital twin // GovInsiders. 2017. <https://govinsider.asia/intl-en/article/meet-virtual-singapore-citys-3d-digital-twin>
9. Preut A., Kopka J.-P., Clausen U. Digital twins for the circular economy // Sustainability. 2021. № 13.
10. Saracco R. Digital Twins: Evolution in Manufacturing. 2022. <https://digitalreality.ieee.org/images/files/pdf/2022may-ebook-digitaltwins-manufacturing2.pdf>
11. Shafto M. Modeling, simulation, information technology & processing. draft technology roadmap area. 2010. Vol. 11, Washington, DC. https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf
12. Slepneva T., Chernysheva M., Zaitseva K. Impact of digital twin technology on the financial performance of corporations // European proceedings of social and behavioural sciences. 2021. Vol. 79. pp. 1223-1231.
13. Stark, R., Damerou, T. Digital twin. Ed. by S. Chatti, T. Tolio. CIRP encyclopedia of production engineering // CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Vol. 66. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2019. pp. 1-8.
14. Trauer J., Schweigert-Recksiek S., Engel C., Spreitzer K., Zimmermann M. What is a digital twin? - Definitions and insights from an industrial case study in technical product development // Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference. 2020. № 1. pp. 757-766.
15. What is digital twin technology – and why is it so important? // Forbes. 2017. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/?sh=2c10330b2e2a>

Development and implementation of digital twins to optimize bakery lines

Denis V. Turansky

Manager for work with Key Opinion Leaders
Nestle Russia LLC
Moscow, Russia
turansky@mail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 03.02.2024

Accepted 21.03.2024

Published 15.04.2024

UDC 664.66:004.94

EDN ULLOEK

VAK 4.3.3. Food systems (technical sciences)

OECD 02.11.JY FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

Digital twins represent a promising tool for optimizing production processes, including in the bakery industry. The purpose of this study is to develop and test a technique for creating digital counterparts of bakery lines to increase the efficiency of their operation. The work uses a set of methods of mathematical modeling, computer simulation and machine learning. Based on a detailed analysis of technological processes and equipment of the TONOYAN bakery, dynamic models of key production sites have been built. A series of experiments was carried out to optimize the parameters of the operation of the lining and dough preparation

departments. The introduction of digital twins in the enterprise allowed: 1) reduce flour consumption by 2.5% while maintaining the quality of finished products; 2) increase line productivity by 5.7% by minimizing downtime; 3) reduce specific energy consumption by 4.1%. The proposed approach can be scaled to bakery production of various types. To achieve maximum effect, it is necessary to adapt models to the specifics of specific enterprises and actively involve personnel in the process of digital transformation.

Keywords

digital twin, bakery production, process optimization, mathematical modeling, machine learning, energy efficiency.

References

1. Kokorev D.S., Yurin A.A. Managerial personnel: understanding, types and activities for business // *Colloquium-journal*. 2019. № 10(34). pp. 101-104.
2. Digital doppelgangers, cyber citizens and the new mobility // *IQ.HSE.RU*. 2023. <https://iq.hse.ru/news/809011709.html?ysclid=lfe6w8bv8e567502735>
3. For a digital twin of the grid // Siemens. 2017. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:09c20834-4ed4-49d8-923d-ebcc541cab37/inno2017-digitaltwin-e.pdf> (дата обращения: 24.04.2023)
4. Fu Y., Zhu G., Zhu M. Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance // *An overview. Chinese journal of mechanical engineering*. 2022. № 35.
5. Fuller A., Fan Z., Day C. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 108952-108971.
6. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches*. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 85-113.
7. Liu Z., Meyendorf N., Mrad N. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin // *AIP Conference Proceedings*. 20 April 2018. 2018.
8. Meet Virtual Singapore, the city's 3D digital twin // *GovInsiders*. 2017. <https://govinsider.asia/intl-en/article/meet-virtual-singapore-citys-3d-digital-twin>
9. Preut A., Kopka J.-P., Clausen U. Digital twins for the circular economy // *Sustainability*. 2021. № 13.
10. Saracco R. Digital Twins: Evolution in Manufacturing. 2022. <https://digitalreality.ieee.org/images/files/pdf/2022may-ebook-digitaltwins-manufacturing2.pdf>
11. Shafto M. Modeling, simulation, information technology & processing. draft technology roadmap area. 2010. Vol. 11. Washington, DC. https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf
12. Slepneva T., Chernysheva M., Zaitseva K. Impact of digital twin technology on the financial performance of corporations // *European proceedings of social and behavioural sciences*. 2021. Vol. 79. pp. 1223-1231.
13. Stark, R., Damerau, T. Digital twin. Ed. by S. Chatti, T. Tolio. *CIRP encyclopedia of production engineering // CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Vol. 66. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2019. pp. 1-8.
14. Trauer J., Schweigert-Recksiek S., Engel C., Spreitzer K., Zimmermann M. What is a digital twin? - Definitions and insights from an industrial case study in technical product development // *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*. 2020. № 1. pp. 757-766.
15. What is digital twin technology – and why is it so important? // *Forbes*. 2017. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/?sh=2c10330b2e2a>