

УДК 658.5.012.1

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

А.А. Кононова (Москва)

Введение

Расширение рынка молока и молочной продукции признается приоритетом государственной экономической политики в связи с высоким социальным значением данной товарной группы для населения Российской Федерации.

Также развитие автоматизации на предприятиях требует разработки математических моделей для оптимизации процессов производства молочной продукции. Наиболее детальный анализ всех стадий производства обеспечивает метод имитационного моделирования.

Имитационное моделирование – это метод, направленный на исследование сложных объектов и процессов при помощи их моделей и проведения вычислительных экспериментов. В экономике имитационное моделирование считается ключевым инструментом для разработки оптимальных бизнес-планов и инвестиционных проектов.

Внедрение имитационного моделирования в молочной промышленности позволяет добиться значительных преимуществ по сравнению с проведением экспериментов на реальных объектах, а именно: сократить время и затраты, повысить точность и повторяемость результатов, обеспечив при этом наглядность и универсальность анализа.

Тема актуальна, потому что имитационная модель производства помогает:

- оценивать влияние изменения характеристик оборудования на весь производственный процесс;
- осуществлять прогнозирование количества молочной продукции по данным о поступаемом объеме молока;
- избегать эффекта «узкого горлышка» в процессе производства в результате некорректного распределения ресурсов;
- имитировать распределение рабочей силы для оценки возможностей транспортировки и доставки товаров.

Цель исследования – развитие и совершенствование процессов производства молочной продукции молочного комбината за счет использования методов имитационного моделирования для повышения качества производимого продукта и снижения себестоимости.

В рамках данного исследования сформулированы и реализованы следующие задачи:

- выполнить анализ процесса производства молочной продукции, определить ключевые параметры, влияющие на общую эффективность молочного комбината;
- разработать имитационную многоагентную модель производства молочной продукции, учитывающую взаимосвязи между технологическими потоками и общими ресурсами.

Методы решения задач

Диаграммы были построены с использованием бесплатного онлайн-сервиса Draw.io, что обеспечило наглядное представление архитектуры системы. Разработка имитационной модели выполнена в среде AnyLogic с применением дискретно-событийного подхода, позволяющего адекватно воспроизвести логику технологического процесса.

Результаты

Для создания имитационной модели был проведен детальный анализ процесса производства молочной продукции с помощью сторонних ресурсов ([1], [2], [3]) и консультаций с работниками данной отрасли. Была создана диаграмма, демонстрирующая процесс производства молочной продукции (рис. 1).

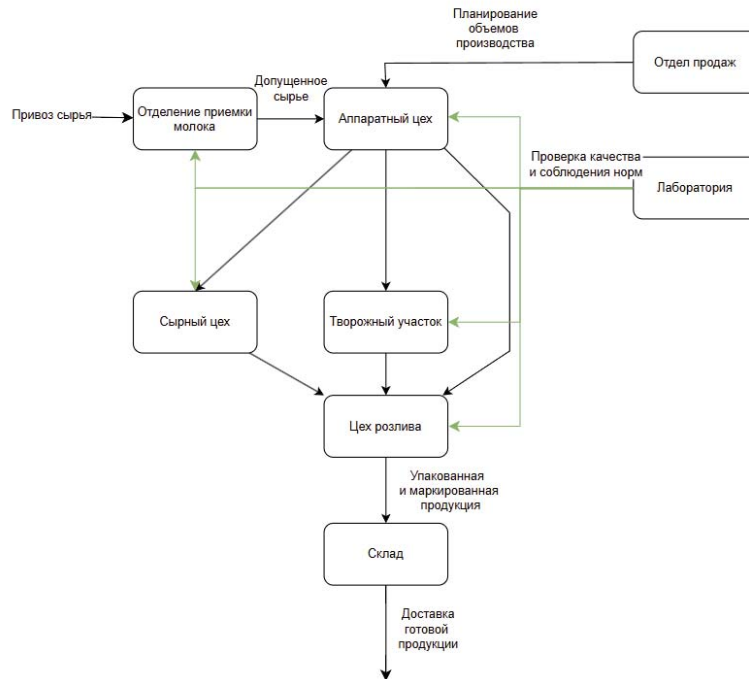


Рис. 1. Диаграмма процесса производства молочной продукции

Производство молочной продукции осуществляется на следующих участках завода: отделение приемки молока, аппаратный цех, цех розлива, творожный участок, сырцех.

Исходя из предоставляемого функционала для разработки имитационной модели была выбрана среда AnyLogic и дискретно-событийный подход.

Параметризация имитационной модели выполнена на основе усредненных технологических показателей, характерных для типовых предприятий молочной промышленности. Разделение потока по жирности продуктов не предусмотрено.

Молоко с помощью молокоцистерны поступает в отделение приемки молока, в котором в лаборатории приемки молока берут необходимые пробы. Принятое сырое молоко очищают от механических примесей. Данные этапы реализованы с помощью библиотеки дорожного движения и библиотеки моделирования потоков (рис. 2). Грузовой автомобиль приезжает на парковку (carSource, carMoveto, catExit), где с помощью блока AgentToFluid преобразуется в заданное параметром количество молока. Логика процесса контроля качества реализована комбинацией блоков задержки (delay) и условного ветвления (selectOutput5), что с вероятностью 1 % не допускает сырье на производство. Детализация вспомогательных процессов была сознательно опущена.

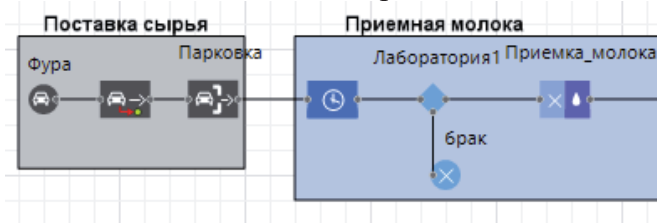


Рис. 2. Реализация поставки сырья и приемки молока

Затем молоко попадает в аппаратный цех, где и происходят необходимые физические превращения: сепарирование, составление нормализованных смесей, очистка, гомогенизация, пастеризация, охлаждение и транспортировка в другие цехи согласно заявке [1]. В процессе сепарирования происходит разделение на сливки и обезжиренное молоко. В имитационной модели технологическая цепочка аппаратного цеха реализована с использованием резервуаров для обработки (processTank), трубопроводных систем (pipeline) и разделителей потоков (fluidSplit), структура которых представлена на рис. 3.

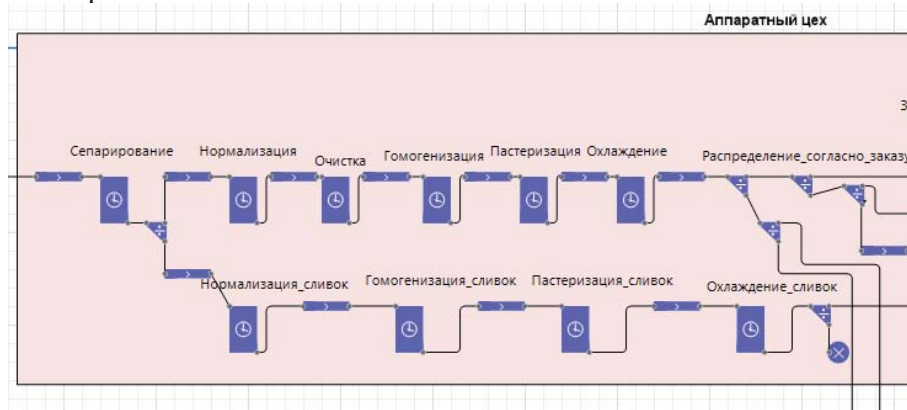


Рис. 3. Реализация функционирования аппаратного цеха

В аппаратном цехе вырабатываются следующие виды цельномолочной продукции: молоко пастеризованное, кефир, сметана, йогурт. На творожном участке производят творог. Сырцех осуществляет производство сыра двух видов: копченый и неkopченый. В данной работе детально рассмотрен процесс производства адыгейского сыра.

Процесс производства пастеризованного молока включает все этапы, производимые в аппаратном цехе, с последующими розливом, упаковкой и маркировкой.

Рассмотрен резервуарный способ выработки кефира, при котором процесс сквашивания происходит в больших емкостях, а затем готовый продукт разливается. Производство кефира использует полученное охлажденное пастеризованное молоко, которое заквашивают и сквашивают в резервуарах для кисломолочных продуктов [4]. Молоко с внесенной закваской перемешивают. В имитационной модели вышеописанный процесс формализован с помощью логики, реализованной в блоках fluidSource и mixTank. После перемешивания молока с закваской его оставляют в покое в резервуаре для сквашивания несколько часов. Данный этап смоделирован с использованием блока processTank. Перемешанный и охлажденный молочный сгусток оставляют в покое для созревания. После следует процесс розлива, упаковки и маркировки с предварительным охлаждением в холодильной камере и перемешиванием. Этапы перемешивания и охлаждения объединены и реализованы с помощью блока ProcessTank. Результат показан на рис. 4.

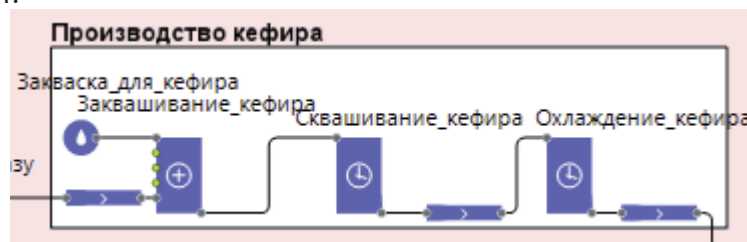


Рис. 4. Имитация производства кефира

Для выработки сметаны применяют следующее сырье: молоко коровье пастеризованное, закваску для сметаны, питьевую воду [1]. В реализованной модели рассмотрено только добавление закваски в сливки, образованные после сепарирования молока. Технологический процесс производства сметаны резервуарным способом состоит из приемки и подготовки сырья; нормализации сливок, гомогенизации, пастеризации и охлаждения сливок, заквашивания и сквашивания сливок, перемешивания сквашенных сливок, упаковки, маркировки, охлаждения и созревания. Предполагается выполнение последних двух этапов на складе в холодильных камерах. Нормализованные сливки, полученные при сепарировании молока, гомогенизируют перед пастеризацией. Данные этапы реализованы в аппаратном цехе.

Процесс заквашивания и сквашивания сливок осуществляют в резервуарах. Для сквашивания сливок используют предназначенные для выработки сметаны закваски. Объемная доля закваски по отношению к объему заквашиваемых сливок составляет 8 %. В имитационной модели вышеописанный процесс формализован с применением блоков fluidSource и mixTank. Заквашенные сливки перемешивают и оставляют в покое для сквашивания, что реализовано с помощью блока ProcessTank. Далее осуществляется перемешивание и охлаждение полученной массы, фасовка сметаны в упаковку и маркировка. Транспортировка сырья выполнена с использованием элементов типа pipeline.

Визуализация процесса выработки сметаны представлена на рис. 5.

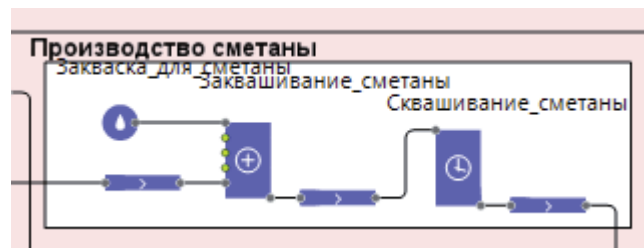


Рис. 5 – Реализация выработки сметаны

Для производства йогурта используется следующее сырье: молоко коровье пастеризованное, заквасочные культуры, фруктовые или ягодные наполнители, сахарный сироп, стабилизаторы [6]. В реализованной модели рассмотрено только добавление закваски и наполнителей. Технологический процесс производства йогурта состоит из следующих этапов: все этапы обработки молока, внесение закваски и сквашивание в резервуаре, внесение наполнителей, охлаждение и перемешивание молочного сгустка, упаковка, маркировка и окончательное охлаждение. Последние три этапа осуществляются на складе. Процесс заквашивания и сквашивания осуществляют в закрытых резервуарах. Закваску вносят в количестве 3 %. Молоко с внесенной закваской тщательно перемешивают для равномерного распределения и оставляют в покое для сквашивания. Продолжительность сквашивания составляет от 2 до 3 часов до достижения плотного сгустка и требуемой кислотности. Готовый сгусток охлаждают до требуемой температуры непосредственно в резервуаре. В охлажденный йогурт вносят подготовленный фруктовый наполнитель в количестве 20 % от объема и тщательно перемешивают. Полученную смесь направляют на розлив в потребительскую тару, упаковку и маркировку.

Логика процесса реализована с использованием библиотеки Process Modeling Library. Хранение и дозирование закваски и наполнителей организовано с помощью элементов типа FluidSource. Операция смешения компонентов моделируется блоком MixTank. Транспортировка продукта между технологическими узлами осуществляется с использованием элемента Pipeline. Функционирование резервуарного оборудования

(сбраживание, охлаждение, созревание) реализовано на основе блока ProcessTank. В целях оптимизации вычислительной сложности модели операции перемешивания интегрированы с соседними технологическими этапами. На рис. 6 показан участок производства йогурта построенной дискретно-событийной модели.

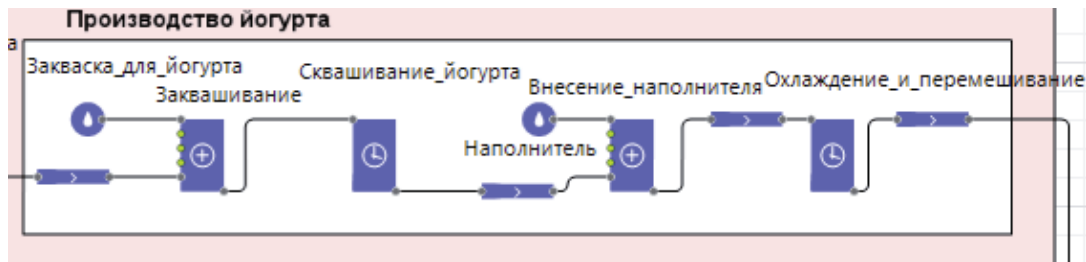


Рис. 6. Реализация производства йогурта

Для изготовления творога необходимо молоко обезжиренное, молоко пастеризованное, сливки, закваски для творога, вода питьевая и кальций [7]. В данной работе процесс постепенного добавления продуктов объединен в один. В подготовленное молоко добавляется закваска. Её количество нормируется и составляет 5% от объема молока, что обеспечивает необходимую активность процесса и контроль над временем сквашивания. После внесения в молоко закваски добавляют хлористый кальций и другие необходимые порошки. После следует процесс сквашивания. Готовый сгусток разрезают на кубики необходимых размеров. После оставляют в покое для выделения сыворотки. В дальнейших этапах производства она не участвует. Мешки со сгустком транспортируют для обработки в специализированное оборудование. Далее творог охлаждают и упаковывают в потребительскую тару. Имитационная модель состоит из элементов типа pipeline, processTank для всех описанных процессов кроме заквашивания, реализуемого с помощью MixTank. Для закваски бы применен fluidSource. Отделение сыворотки выполнено с использованием fluidSplit и fluidDispose. Рассмотренный участок продемонстрирован ниже (Рис. 7).

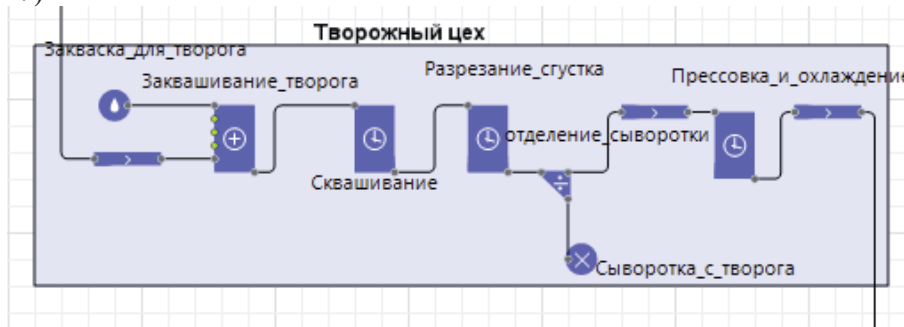


Рис. 7. Имитация функционирования творожного цеха

Адыгейский сыр изготавливают из следующего сырья: молоко коровье пастеризованное, сыворотка молочнокислых культур, рассол, питьевая вода [8]. В данной модели рассматривается добавление закваски и рассола с помощью блоков fluidSource, MixTar, pipeline. Образующаяся в процессе производства сыворотка, как побочный продукт, выводится из системы с использованием элементов fluidDispose и fluidSplit.. Технологический процесс производства адыгейского сыра состоит из следующих этапов: приемка и подготовка молока, пастеризация и охлаждение молока, внесение кислоты или сыворотки, дробление и отделение сыворотки, формование и самопрессование, посолка, термическая обработка (копчение) для копченой вариации. В охлажденное пастеризованное молоко вносят кислоту или сыворотку в количестве 10 %. Всплывшую массу выкладывают в формы, в которых происходит процесс

самопрессования (блок ProcessTank). Самопрессованные сырные головки отправляются на посолку в рассоле. Далее сыр обсушивается и созревает. Для производства копченого адыгейского сыра просоленные сырные головки подвергают термической обработке. После копчения сыр охлаждают и направляют на хранение. Транспортировка сырных головок между технологическими зонами обеспечена конвейерной системой на основе элементов Convey. Стадии копчения и финального охлаждения реализованы посредством блоков Delay

Реализация работы сырного цеха показана на рис. 8.

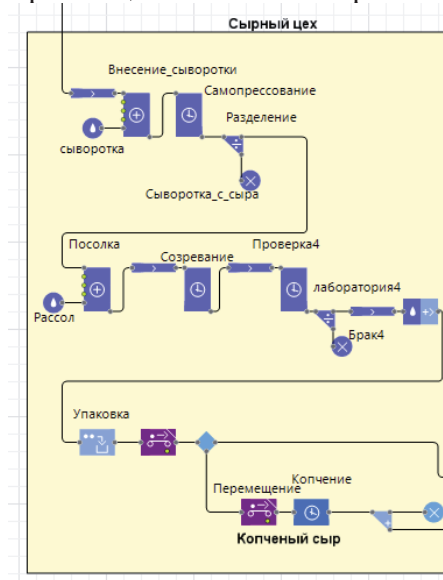


Рис. 8. Реализация работы сырцеха

В процессе производства молочной продукции осуществляются постоянные проверки и контроль качества, соблюдения норм [3]. В целях оптимизации в представленной имитационной модели все этапы проверки объединены в одну, осуществляемую перед процессами упаковки, маркировки и транспортировки на склад.

Реализация модуля контроля качества выполнена с использованием комбинации элементов Fluid Library: delay, fluidsplit, fluiddispose и pipeline. Длительность процедуры контроля задается пропорционально количеству персонала, задействованного в лабораторных исследованиях. Реализация показана на ниже (рис. 9).

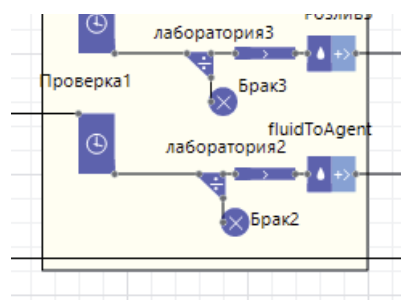


Рис. 9. Участок контроля качество производимого продукта

В цехе розлива осуществляется фасовка, упаковка и маркировка производимых продуктов (рис. 10). Элементы типа fluidToAgent расположены в соответствующих цехах. Они преобразуют поток сырья в агент молочного продукта, имитируя процесс заполнения потребительских тар. Упаковка реализована с помощью блока branch, образующего партии. Convey осуществляет перемещение товара на склад по ленточным конвейерам. Элементы delay и selectOutput2 необходимы для проверки наличия готового

к погрузке грузового автомобиля. Блок retrieve выполняет транспортировку готовой продукции в изотермические фургоны с помощью грузчиков. В процессе приготовления адыгейского сыра между разбиением на партии и перемещением на склад добавлены блоки Delay, имитирующие процессы созревания и копчения продуктов.

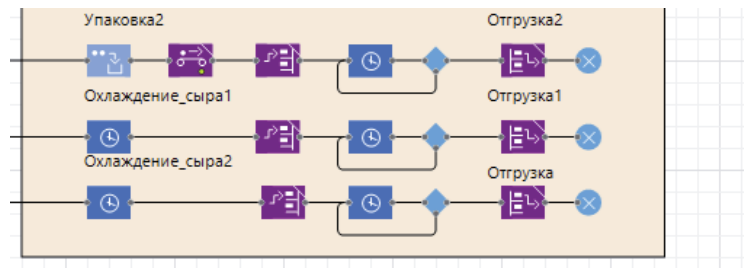


Рис. 20. Участок розлива и упаковки

Участок транспортировки готовой продукции реализован с помощью библиотеки моделирования дорожных систем. Используются блоки carSource, delay, carMoveTo, carDispose.

Разработанная потоковая диаграмма процесса производства молочной продукции показана на рис. 11.

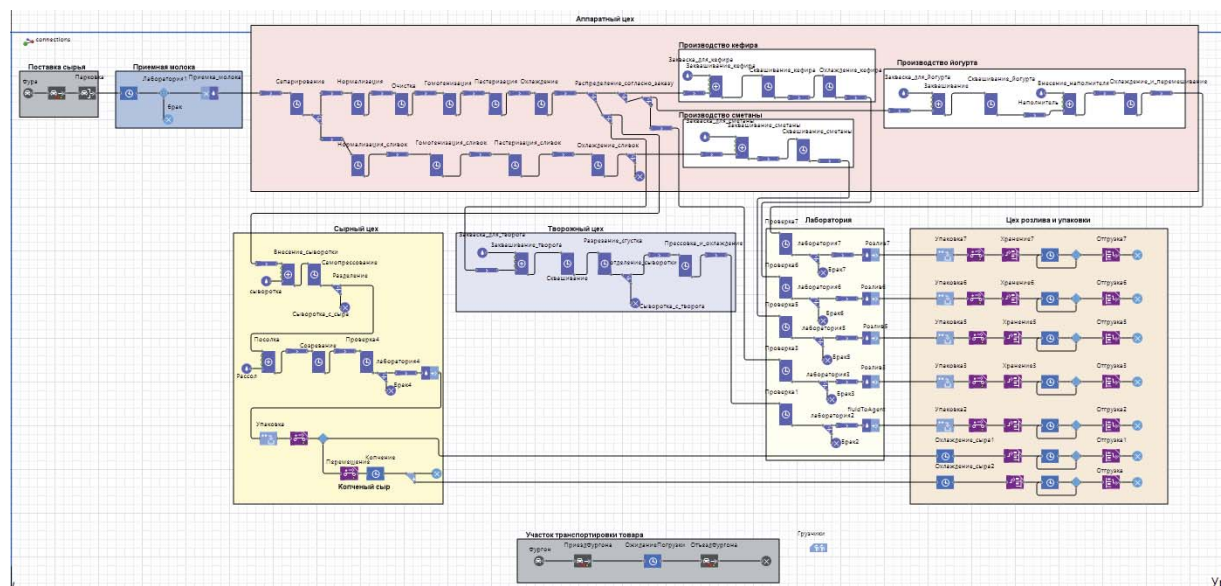


Рис. 31. Потоковая диаграмма процесса производства молочной продукции

Для каждого производимого молочного продукта был создан свой агент, имитирующий передвижение товара или партии товаров от момента розлива по потребительским тарам до транспортировки в места продаж.

Также был создан агент для транспортировки сырья и готовой продукции. Из-за ограничений бесплатной версии AnyLogic на количество агентов автотранспортные средства не были разделены на разные категории: молокоцистерну и изотермический фургон для городских перевозок. Агент «Грузовик» имитирует работу всех автомобилей. Для реализации работы сотрудников по погрузке машин создан агент «Работник».

Все существующие агенты приведены на рис. 12.

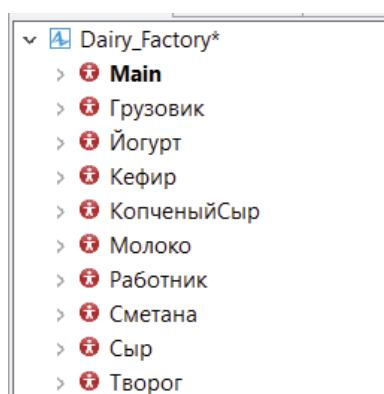


Рис. 42. Агенты модели

Для выполнения поставленных задач были созданы параметры, показанные на рис. 13. В частности, «Процент_молока» указывает, какой процент молока нужно выделить на соответствующий молочный продукт. В реализованной модели не предусмотрена защита от неверно выставленных параметров.

При анимации работы многоагентной модели вышеперечисленные параметры можно изменять с текстового поля.

Также использованы следующие переменные для реализации движения фургона и вывода информации на графиках.

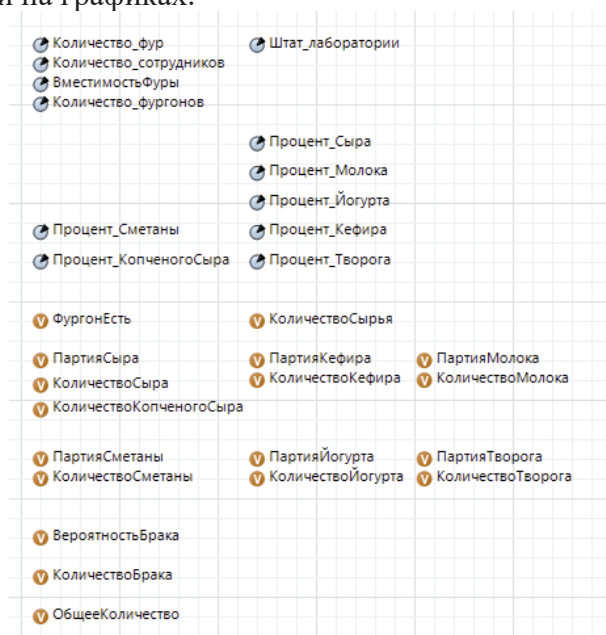


Рис. 53. Параметры и переменные модели

Для подтверждения функциональности модели был применен метод визуального анализа анимации процесса моделирования в двухмерном пространстве.

На рис. 14 представлен снимок экрана 2D-анимации работы модели. Наблюдаемые на анимации отсутствие тупиковых ситуаций и логичная маршрутизация потоков подтверждают работоспособность и сбалансированность созданной модели.

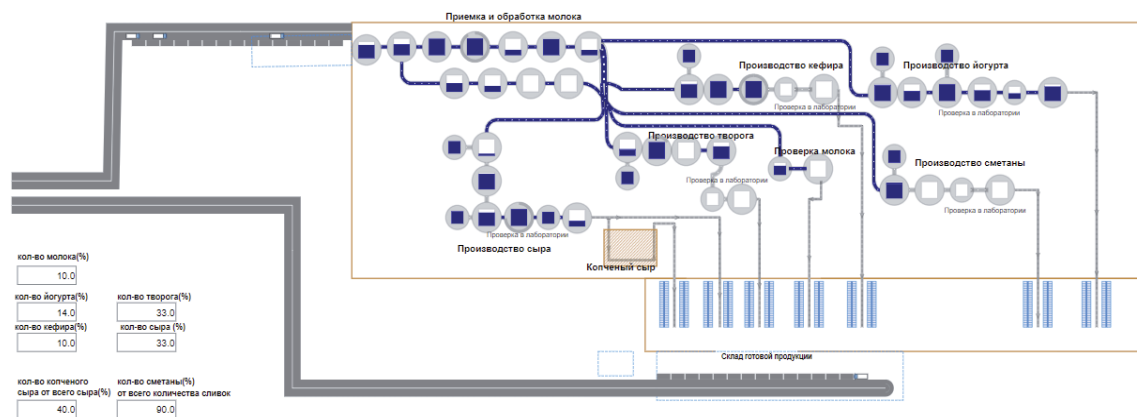


Рис. 64. Снимок экрана 2D-анимации работы модели

Также осуществлено графическое представление информации о количестве партий производимых продуктов и показателе эффективности модели, равного отношению количества бракованных продуктов к общему количеству (рис. 15-16).

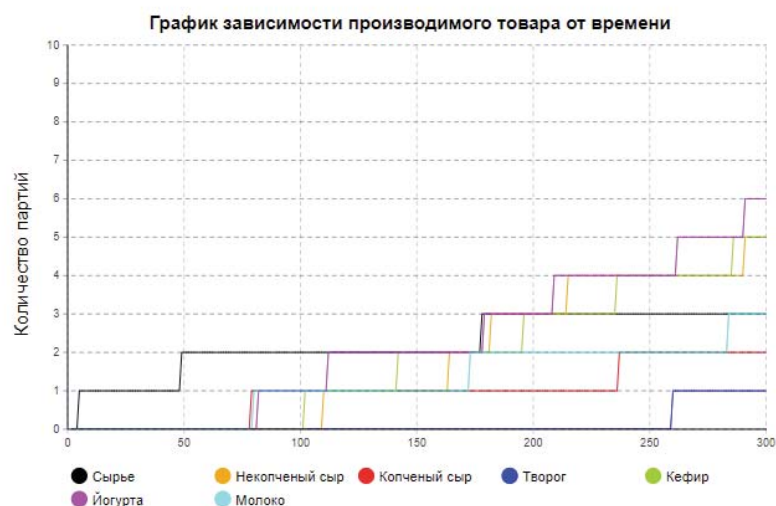


Рис. 75. График зависимости производимого товара от времени

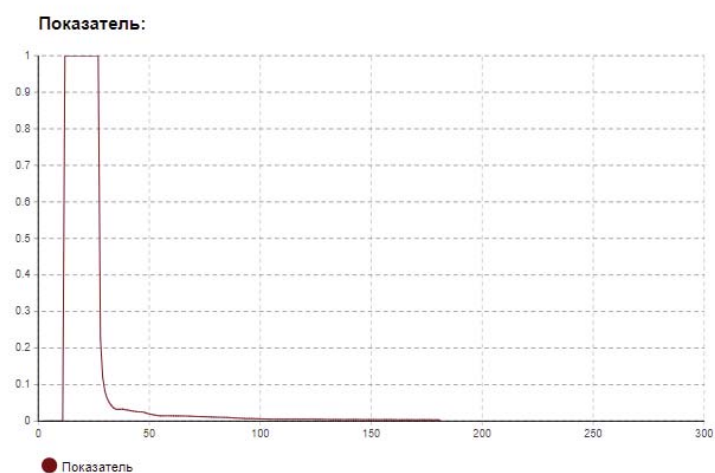


Рис. 86. График зависимости показателя оптимизации от времени

Обсуждение полученных результатов

Проведенный анализ научной литературы показал отсутствие аналогов, комплексно моделирующих процесс производства молочной продукции с использованием дискретно-событийного подхода в среде AnyLogic. Известные работы [5] посвящены либо рассмотрению более глобальных систем, либо оптимизации отдельных участков, в то время как данная работа предлагает целостное моделирование взаимодействия всех элементов производственной системы молочного предприятия с динамическим изменением спроса на конкретные продукты.

На основе анализа исходных данных построена диаграмма процесса производства.

Выявлены значительные преимущества имитационного моделирования для многопрофильного молочного предприятия:

- моделирование альтернативных сценариев распределения сырьевых ресурсов между параллельными технологическими линиями;
- оценка влияния изменения ассортиментной политики на общие показатели эффективности работы комбината;
- минимизация ошибок при планировании использования производственных мощностей.

В отличие от традиционных методов планирования, предложенный подход позволяет оценивать риски возникновения «узких мест» без проведения дорогостоящих испытаний на реальном производстве.

Заключение

Основные научные и практические результаты исследования заключаются в следующем:

- осуществлен комплексный анализ производственных процессов как объектов управления;
- разработана многоагентная система поддержки принятия решений;
- создана имитационная мультиагентная модель, которая структурированно отображает все этапы производства и учитывает внутренние взаимосвязи между технологическими переделами.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением функциональности модели для других видов молочной продукции и интеграцией с системами реального времени для создания цифрового двойника.

Таким образом, применение имитационного моделирования представляет собой эффективный инструмент повышения конкурентоспособности предприятий молочной отрасли за счет оптимизации использования ресурсов и улучшения качества управленческих решений.

Литература

1. Технология молока и молочных продуктов: учебное пособие для обучающихся по направлению подготовки 19.06.01 Промышленная экология и биотехнологии направленность 05.18.04 Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств / сост.: В.В. Крючкова; Донской ГАУ. – Персиановский : Донской ГАУ. 2018. – 232 с.
2. **Асканова О.В.** Значение имитационного моделирования в управлении деятельностью предприятия / О.В. Асканова, Е.В. Касаткина // Среднерусский вестник общественных наук. Экономика и управление. – 2010. №3. С. 177-181.
3. Идентификация и обнаружение фальсифицированной продукции : учебное пособие по направлению подготовки 38.03.07 Товароведение / сост.: П.В. Скрипин, А.В.

- Козликин, Р.Б. Жуков, А.И. Тариченко, А.В. Клопова, О.В. Гартованная ; Донской ГАУ. – Персиановский : Донской ГАУ, 2019. 157 с.
4. **Крылова Л.А.** Разработка моделей, методов и алгоритмов интеллектуальной автоматизированной системы контроля и управления качеством кефира: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Л. А. Крылова. – М.: 2022. – 235 с.
 5. Использование методов имитационного моделирования для анализа функционирования процессов производства кефира / М. Ю. Музыка, И. Г. Благовещенский, В. Г. Благовещенский, С. А. Мокрушин, М. М. Благовещенская //Процессы и аппараты пищевых производств. – 2021.
 6. Технология производства йогурта на современном заводе [Электронный ресурс] – URL: <https://afsv.ru/blog/kak-delayut-yogurt-na-zavode/?ysclid=mftyck2ag6205402525> (дата обращения: 20.09.2025).
 7. Технологии производства творога: как делают творог на заводе [Электронный ресурс]. – URL: https://afsv.ru/blog/tehnologiya-proizvodstva-tvoroga/?ysclid=mfuqu todw664694208#_Toc169621044 (дата обращения: 20.09.2025).
 8. Технология производства адыгейского сыра [Электронный ресурс]. – URL: <https://apsfood.ru/poleznaya-informatciya/tehnologiya-proizvodstva-adygeyskogo-syra/?ysclid=mfu0lvwihj54880355> (дата обращения: 20.09.2025).