



Научная статья  
УДК 664.8

## АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИБКИХ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

О.В. Агеев<sup>1,\*</sup>, О.А. Лизоркина<sup>1</sup>, Н.В. Самойлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

\* E-mail: [oleg.ageev@klgtu.ru](mailto:oleg.ageev@klgtu.ru)

**Аннотация.** Проанализировано понятие гибкой пищевой системы. Рассмотрены системные принципы построения пищевой системы и разработана ее концептуальная модель. Приведена обобщенная схема информационных потоков на пищевых производствах. Описаны различные компоненты пищевых систем с характеристиками их функционального назначения. Проанализирована структура производственной системы пищевой отрасли. Рассмотрены методологические подходы к математическому моделированию пищевых систем. Процесс функционирования производственной системы рассмотрен в виде топологической модели. Совокупность агрегатов пищевой системы интерпретирована как система массового обслуживания, поток заявок в которой характеризуется свойствами стационарности, отсутствием последствия и ординарности. Анализ такой системы позволяет определить при проектировании требуемую производительность, коэффициент использования производственной системы, среднее время ожидания обслуживания, среднюю длину очереди заявок, коэффициент использования транспортных приспособлений, конструктивные, технологические, эксплуатационные отказы машин и другие важные параметры технологических линий. Рассмотренная методология моделирования пищевых систем создает основу для построения их имитационных математических моделей.

**Ключевые слова:** пищевая система; производственная система; моделирование; топологическая модель; система массового обслуживания.

**Для цитирования:** Агеев О.В., Лизоркина О.А., Самойлова Н.В. Анализ методологических принципов моделирования гибких пищевых систем // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №2. С. 7–24.

Original article

## ANALYSIS OF METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF FLEXIBLE FOOD SYSTEMS MODELING

O.V. Ageev<sup>1,\*</sup>, O.A. Lizorkina<sup>1</sup>, N.V. Samojlova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

\* E-mail: [oleg.ageev@klgtu.ru](mailto:oleg.ageev@klgtu.ru)

**Abstract.** The concept of a flexible food system is analyzed. The systemic principles of building a food system are considered and its conceptual model is developed. A generalized scheme of information flows in food production is given. Various components of food systems with characteristics of their functional purpose are described. The structure of the production system of the food industry is analyzed. Methodological approaches to mathematical modeling of food systems are considered. The process of functioning of the production system is considered in the form of a topological model. The set of food system aggregates is interpreted as a queuing system,

the flow of applications in which is characterized by the properties of stationarity, the absence of aftereffect and ordinaryness. The analysis of such a system makes it possible to determine the required performance during design, the utilization rate of the production system, the average waiting time for service, the average length of the queue of applications, the utilization rate of transport devices, design, technological, operational failures of machines and other important parameters of production lines. The considered methodology for modeling food systems creates the basis for building their simulation mathematical models.

**Key words:** *food system; production system; modeling; topological model; queuing system.*

**For citation:** Ageev O.V., Lizorkina O.A., Samojlova N.V. Analysis of methodological principles of flexible food systems modeling. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9. No. 2. pp. 7–24.

## Введение

В современных экономических условиях прогрессивной является такая форма хозяйствования, которая активно и динамично реагирует на возникающие задачи. Научно-технический анализ развития пищевой отрасли показывает, что именно гибкая структура производства наилучшим образом соответствует требованиям заказчиков, условиям конкурентоспособности продукции, обеспечению рентабельности и эффективности предприятий.

Необходимость систематического обновления ассортимента пищевой продукции и существенные изменения в структуре производственных связей обусловили переход отраслевых организаций от автоматизации отдельных элементов технологического процесса к комплексной автоматизации на всех уровнях. Базой для решения этой проблемы явились особые свойства современного технологического оборудования: его способность к быстрой переналадке на выпуск новой продукции за счет гибкости и мобильности; высокий технический уровень технологических машин; выпуск конкурентоспособной и качественной продукции.

Одновременно современная пищевая техника способствует решению проблемы по улучшению труда персонала, создает предпосылки для постепенного стирания граней между умственным и физическим трудом, освобождает работающих от тяжелого физического труда, стимулирует повышение профессионального уровня операторов, создает объективные условия для повышения производительности труда.

Необходимость применения высокоавтоматизированных мехатронных машин в пищевой отрасли ставит перед высшей школой задачу подготовки специалистов по разработке и эксплуатации такого оборудования. Увеличивается спрос на фундаментально-прикладное образование в области мехатроники - актуальной области науки и техники, посвященной созданию и эксплуатации машин с компьютерным управлением на базе знаний оборудования, механики, электроники, микропроцессорной техники, всех типов приводов, информатики, систем управления машинами и агрегатами. Инженеры-мехатроники (механики и электроники одновременно) востребованы на пищевых предприятиях практически любого профиля, где внедряются, эксплуатируются, обслуживаются и модернизируются современные гибкие системы. В целом оборудование становится более сложным и комплексным.

Гибкая автоматизация и увеличение информационных связей изменили общую тенденцию развития пищевой отрасли в направлении интеграции производства и управления, что привело к формированию новых структур – гибких пищевых систем [1]. Главное отличие таких систем от традиционных пищевых производств заключается в широкой интеграции подсистем сырьевого обеспечения, контроля качества изделий, складирования и транспортирования продукции, технического обслуживания, диспетчеризации и переналадки производства. Особую роль в интеграции указанных подсистем играют технологии прослеживаемости производства, которая заключается в

автоматизированном отслеживании движения, местонахождения и происхождения пищевых материалов на всех стадиях производства, обработки и распределения.

Проектирование таких систем требует глубокого понимания целей их создания, содержания задач и принципов эффективного использования, а также четкости в определении основных методологических позиций.

Решение указанных проблем видится в углублении познаний о структурных закономерностях построения гибких пищевых систем, их свойств и особенностях функционирования в различных условиях. При формировании указанных систем повышение уровня проектных решений, их эффективности и качества возможно осуществлять только при условии непрерывного совершенствования методологии проектирования. Стоимость гибких пищевых систем достаточно велика, а эффективность внедрения во многом определяется на стадии проектирования, что заставляет оценивать результативность проектного решения до его реализации.

Вышеуказанными обстоятельствами продиктована необходимость анализа и совершенствования методологических принципов создания гибких пищевых систем, основой которых являются моделирование их работы с использованием теории графов, теории конечных автоматов, теории исследования операций, теории систем массового обслуживания, имитационного моделирования и другого проектного инструментария. Полное и всестороннее исследование рассматриваемых систем предполагает их моделирование на ЭВМ как сложных систем на базе функциональных моделей, последующее исследование их работы в широком диапазоне варьирования входных параметров и определение выходных характеристик. Зачастую на предприятиях массовый и мелкосерийный типы производства существуют одновременно по причине переменного спроса. В связи с этим, необходимо развивать теорию построения пищевых систем с заданными свойствами, способными оперативно приспосабливаться к изменяющимся условиям окружения.

Целью настоящей работы является анализ методологической основы для построения структурных и функциональных моделей гибких пищевых систем, позволяющих исследовать взаимосвязи между их основными варьируемыми параметрами и показателями производительности, надежности, рентабельности для различных вариантов структур и режимов работы. Наличие такой методологии позволяет определить оптимальные параметры проектируемых пищевых систем.

### **Анализ понятия пищевой системы**

В российской и зарубежной научной литературе под пищевой системой понимается комплексная система производства, обработки, распределения, продажи, потребления продуктов питания и утилизации отходов. Пищевая система включает различные производственные, торговые и социальные секторы, а также многих участников: производителей, поставщиков, оптовых и розничных продавцов, потребителей, а также организации, которые занимаются утилизацией отходов [2, 3].

Пищевые системы включают все этапы цепочки производства продуктов питания: от выращивания растений и животных до их переработки, транспортировки, хранения и реализации. Кроме того, важными аспектами являются пищевая безопасность, охрана окружающей среды, борьба с голодом и регулирование сельскохозяйственных рынков [4].

Согласно работам [5, 6], понятие пищевой системы включает в себя также социальные и экономические аспекты, такие как доступность и стоимость продуктов питания, условия труда и заработной платы работников в сельском хозяйстве, торговле и других смежных отраслях.

В работах [7, 8] выделяются следующие этапы функционирования пищевых систем:

1. Производство. Данная стадия связана с выращиванием сельскохозяйственных культур и животноводством. В рамках этой стадии определенного рода продукты

выращиваются, после чего их можно использовать в качестве ингредиентов для производства более сложных пищевых продуктов.

2. Обработка. Данный этап предполагает обработку сырья и изготовление продукции, например, транспортировка, упаковка, консервирование, сушка, мясопереработка, молокопереработка и т.д.

3. Распределение. На этой стадии пищевые продукты доставляются в магазины, кафе, рестораны и домой к потребителям.

4. Розничная торговля. Данная стадия связана с продажей продуктов на потребительском уровне, в магазинах, супермаркетах и других местах.

5. Потребление. Данный этап связан с приемом пищи людьми. Этот этап включает в себя выбор продуктов, приготовление пищи и ее употребление.

6. Утилизация отходов - это стадия, связанная с обработкой отходов пищевой промышленности и потребления продуктов.

Работы [9, 10] также отмечают в пищевых системах множество других факторов, таких как экологический, социальный и экономический аспекты производства и потребления пищи, воздействие на здоровье, обеспечение безопасности продуктов и многие другие. Все они связаны между собой, образуя цепочку, на которую влияют макроэкономические, социально-экологические изменения в обществе и изменения в потребительских привычках [11].

Многие современные тенденции в производстве продуктов питания, такие как использование генетически модифицированных организмов, интенсивное использование пестицидов и гербицидов, а также применение антибиотиков в животноводстве, вызывают беспокойство специалистов - как в плане здоровья человека, так и в плане экологической устойчивости [12]. В связи с этим, системный анализ пищевых систем позволяет научно обоснованно разработать безопасные и здоровые методы производства пищевых продуктов, а также обеспечить эффективное и своевременное регулирование на федеральном, региональном и местном уровнях [13].

Другим важным аспектом является исследование влияния пищевых систем на окружающую среду. Изучение вопросов, связанных с экологическими и социальными последствиями производства продуктов питания, помогает принять меры по борьбе с такими проблемами, как изменение климата, энергоёмкость и потребление воды, загрязнение окружающей среды и высокий уровень отходов. Развитие пищевых систем также вносит вклад в решение ряда социальных проблем, связанных с доступностью продуктов питания и уровнем жизни потребителей. Это включает в себя социальные и экономические факторы, такие как доступность и стоимость продуктов питания, условия труда и заработной платы работников в пищевой промышленности, сельском хозяйстве и торговле.

### **Определение и структура пищевой системы**

Пищевая система, включающая комплекс производственных и вспомогательных подразделений (предприятий, хозяйств, цехов, линий, участков, складов), предназначена для изготовления пищевой и технической продукции требуемого качества и заданной программы выпуска. Под продукцией в данном случае понимаются: продукты питания, кормовые, парфюмерно-косметические и табачные изделия, а также технические продукты от переработки вторичных ресурсов – удобрения, смазки, клеи и т.д. Структура и параметры указанной системы определяются в зависимости от состава и функционального назначения выпускаемой продукции, объема ее выпуска и условий изготовления.

Построение пищевой системы, отвечающей заданным требованиям [14], должно выполняться на основе системного подхода, который предусматривает следующие основные этапы ее создания:

1. Формулировку функционального назначения и требований к системе в целом и их формализацию.

2. Декомпозицию пищевой системы, определение функций каждой подсистемы, формализацию требований к подсистемам, выявление внутривидовых материальных и информационных связей подсистем.

3. Построение алгоритмических и параметрических моделей функционирования каждой подсистемы.

4. Синтез пищевой системы на базе разработанных технологических процессов с созданием единой системы материальных и информационных потоков.

5. Разработку компоновочных и планировочных решений по размещению технологического оборудования в производственных и вспомогательных подразделениях.

Системный подход к решению задачи построения пищевой системы требует после уточнения исходных данных проведения ее декомпозиции с целью выделения подсистем и учета взаимосвязей между ними для синтеза составляющих элементов. В основу декомпозиции пищевой системы закладывают принцип функциональности и минимальности. Принцип функциональности состоит в том, что выделенные при декомпозиции подсистемы должны быть по возможности иметь собственную цель функционирования, которая достигается совокупностью целей каждого элемента нижестоящего уровня. Принцип минимальности заключается в достижении минимума уровней декомпозиции, что в итоге приводит к сокращению размерности задач унификации и стандартизации.

Концептуальная модель пищевой системы (рис. 1) отражает комплекс связанных подсистем, обеспечивающих функционирование технологических процессов, начиная от момента первичной подготовки сырья и заканчивая выходом готовой продукции.



Рисунок 1 – Концептуальная модель пищевой системы

Высший уровень декомпозиции пищевой системы предусматривает ее следующие элементы: основную (производственную) систему; систему сырьевого обеспечения; систему упаковки и хранения сырья и продукции; транспортно-логистическую систему; систему проектирования, конструирования, монтажа, ремонта, диагностики и сервисного обслуживания технологического оборудования; систему контроля качества, обоснования и регламентирования показателей безопасности пищевой продукции и технологических процессов; систему менеджмента производства. Ниже кратко рассмотрим характеристики каждой из вышеперечисленных подсистем, которые нашли отражение в паспорте научной специальности 4.3.3 – Пищевые системы.

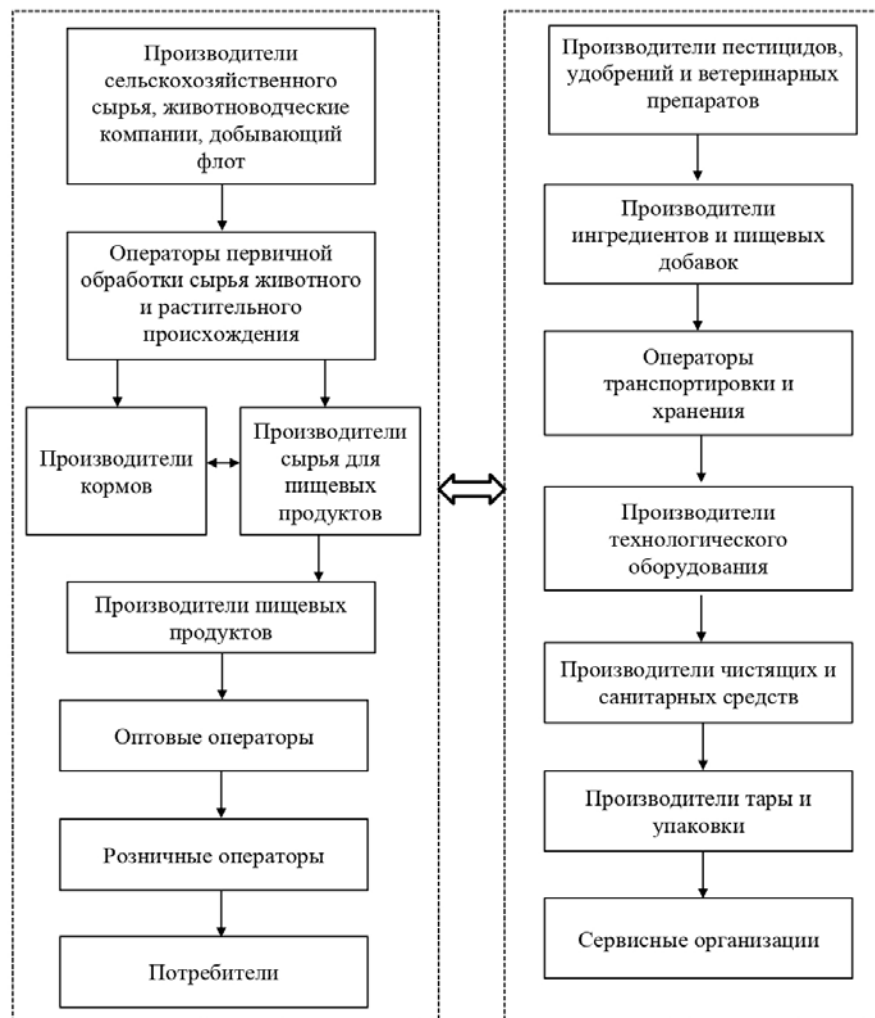


Рисунок 2 – Схема информационных потоков в пищевых системах

В **основной (производственной) системе** осуществляются технологические процессы по изменению качественных характеристик объектов производства. Например, рыбное сырье, пройдя механическую, тепловую и массообменную обработку, приобретает требуемые свойства готового продукта питания (рыбные консервы) [15, 16].

Производственная система - это технологическая основа изготовления пищевых продуктов с использованием производственных ресурсов (сырья, энергии, техники, труда), соответствующих стандартам качества и безопасности. Указанная система включает в себя все этапы производства от приема сырья и хранения до упаковки и выхода готовой продукции на рынок. Задачей производственной системы является обеспечение высокого качества продукции и эффективности производственных процессов при минимальном воздействии на окружающую среду и соблюдении всех норм и требований, установленных законодательством.

При построении производственных систем пищевой отрасли необходимо научное обеспечение в следующих областях: технологии обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства; технологии мясной, молочной и рыбной продукции и холодильных производств; технологии сахара и сахаристых продуктов, чая, табака и субтропических культур; технологии жиров, продуктов переработки растительных масел, масличного и эфиромасличного сырья; технологии функциональных и специализированных продуктов,

пищевых добавок и ингредиентов; технологии продуктов из мяса птицы и яйца; технологии, системы и методы общественного питания; процессов, аппаратов, машин и агрегатов пищевых производств; глубокой переработки сырья и комплексного использования биоресурсов; моделирования и разработки новых пищевых систем с высокоспецифичными межмолекулярными взаимодействиями.

**Система сырьевого обеспечения** нацелена на прижизненное формирование заданного состава, структуры и функционально-технологических характеристик сельскохозяйственного сырья, а также исследование механизмов и прогнозирование трансформаций сырья и пищевых продуктов на различных этапах жизненного цикла продукта. Кроме того, в рамках указанной системы изучаются новые виды ресурсов и вопросы их применения в пищевых системах. Наряду с этим, разрабатываются принципы и методы регулирования, математические и приборные методы оценки состояния сырьевых запасов и величины допустимого промышленного изъятия. Усовершенствуются многовидовые, экосистемные и биоэкономические подходы к рациональному использованию сырьевой базы промышленного рыболовства. Ведется разработка орудий лова и средств механизации промысловых операций, методик их использования, проводится системный анализ промысловых биоресурсов.

В рамках **системы упаковки и хранения сырья и продукции** разрабатываются технологии упаковочных материалов, исследуется методология организации и практическая реализация непрерывной холодильной цепи при производстве, хранении, реализации и потреблении пищевых продуктов. Решаются вопросы аппаратного, машинного и технологического обеспечения холодильных производств и создания холодильной инфраструктуры. Необходимость данной системы обусловлена еще и вероятностным характером спроса на готовую продукцию.

Перемещение и своевременную доставку пищевого сырья, полуфабрикатов и готовой продукции осуществляет **транспортно-логистическая система**. В рамках данной системы осуществляется организация и оптимизация пищевого производства, его логистическое обеспечение, реализация и доставка продуктов питания, кормовой, парфюмерно-косметической и табачной продукции.

**Система проектирования, конструирования, монтажа, ремонта, диагностики и сервисного обслуживания** создается для разработки и постоянного поддержания требуемого состояния и условий работы технологического оборудования. Совершенствуются машины и агрегаты пищевых производств, исследуется их динамика и взаимодействие с окружающей средой, реализуется системный подход при создании технологических линий, проводится оценка стабильности их функционирования [17, 18]. Формируются новые принципы построения технологических процессов, выполняется их аппаратное обеспечение и конструктивная проработка. Важную роль при этом играют автоматизация производства и когнитивные технологии мониторинга и управления технологическими процессами. Указанная система решает также задачи контроля за состоянием производственного процесса и воздействия на него в случае отклонений от запланированных параметров, гибкой наладки и адаптации к изменяющимся условиям среды на базе методов и средств мехатроники. Сюда же следует отнести и метрологическое обеспечение производства.

Выпуск готовых изделий с требуемыми показателями невозможен без **системы контроля качества, обоснования и регламентирования показателей безопасности пищевой продукции и технологических процессов**. В рамках указанной системы исследуют химические и физические свойства пищевых продуктов, физико-химические процессы и их влияние на свойства объектов производства. Предусматриваются обоснование и регламентирование показателей безопасности пищевой продукции и технологических процессов. Разрабатываются методы контроля показателей качества, безопасности, технологической, функциональной и специальной направленности сырья, пищевых и

кормовых продуктов, пищевых и биологически активных добавок, а также методы подтверждения их эффективности. Особое значение имеют стандартизация и управление качеством пищевой, кормовой, парфюмерно-косметической, табачной и иной продукции. В данной системе также решаются проблемы экологизации, биоконверсии и утилизации отходов производственных систем. Кроме того, современное пищевое производство нуждается в обслуживающем персонале, что приводит к созданию специальных устройств и проведения определенных мероприятий, обеспечивающих безопасную работу и санитарные условия труда работающих.

В системе менеджмента производства ведется разработка и применение цифровых технологий для сбора, обработки, анализа баз данных, проектирования пищевых систем в целом [19]. Совершенствуются методология и научные концепции продовольственного обеспечения населения, вырабатываются новые подходы и стратегические решения в этом направлении. Создаются новые принципы и методы товароведения, проводится исследование рынка товаров и сырья, формирование и управление ассортиментом пищевой продукции. Прорабатывается методология формирования и исследования потребительского рынка и продвижения к конечному покупателю пищевых продуктов, кормовой, парфюмерно-косметической и табачной продукции. Наряду с этим, осуществляется разработка научного обеспечения для комплексного решения экономических проблем пищевых систем [20, 21].

### **Структура производственной системы пищевого производства**

Следует отметить, что основным ядром пищевой системы, в которой концентрируются материальные и информационные потоки, является **производственная система** [22, 23]. В связи с этим, рассмотрим общую структуру ее построения. Первичным звеном организации производственного процесса в такой системе является технологическая (машино-аппаратная) позиция. В зависимости от содержания операций и организации их проведения на технологической позиции может находиться машина, аппарат, установка, агрегат, средства автоматизированной загрузки и выгрузки, сортировки, накопления, поштучного разделения, а также средства контроля и управления.

Группы технологических позиций объединяют в технологические линии, где осуществляется относительно локальная законченная часть производственного процесса, в рамках которого осуществляется изготовление полуфабриката или готового изделия. Объединение технологических позиций и обеспечение их функционирования производится транспортно-накопительными устройствами (конвейерами различных типов и внутрицеховым напольным транспортом), системой управления, средствами технического, технологического и метрологического обслуживания, средствами охраны труда работающих на линии.

Более крупным организационно-технологическим элементом производственной системы является производственный цех, который является производственным административно-хозяйственным обособленным подразделением предприятия. Производственным цехом называют помещение, в котором расположены технологические линии, вспомогательные подразделения, служебные и бытовые помещения и помещения общественных организаций.

Современным условиям соответствует концепция создания автоматизированных цехов, которая предъявляет определенные требования к производственным подразделениям и оборудованию, используемому в этих подразделениях. В частности, с целью увеличения гибкости производственной системы при ее создании должна предусматриваться способность к быстрой адаптации при изменяющихся запросах потребителей и сырьевой базе, причем как отдельных единиц технологического оборудования, так и производственных подразделений. Отметим основные факторы, изменяющие условия производства: широкая и зачастую нестабильная номенклатура выпускаемой пищевой продукции отказы технологических машин и аппаратов, рабочих органов и средств управления; неравномерное поступление



полуфабрикатов; изменение физико-механических свойств сырья и т.д. Изменение выходных условий изготовления продукции вынуждает создавать производственные системы, позволяющие быстро реагировать на них, с тем, чтобы обеспечить выполнение производственной программы к заданному сроку и с требуемыми параметрами качества.

При структурном синтезе элементов производственной системы с заранее заданными свойствами необходимо решить сложную задачу обеспечения требуемых свойств всей композиции элементов в производственных подразделениях с ее внутренними и внешними связями. С целью эффективного решения проектных задач предпочтительно синтезировать производственные системы на базе мехатронного оборудования, спроектированного с применением унифицированных модулей и узлов, что сокращает время на проектирование и значительно улучшает гибкость производства в целом.

Из вышеизложенного следует, что при проектировании производственных систем на основе автоматизированных цехов и линий на каждом этапе приходится одновременно решать технологические, экономические и организационные задачи, тесно связанные между собой.

В состав технологических задач входят следующие: формирование перечня требований к производственной системе, исходя из ее назначения; анализ производственной технологичности изготавливаемых пищевых изделий с точки зрения использования мехатронных машин и автоматизированных аппаратов; проектирование технологических процессов; определение производительности и продуктовой материалоемкости операций и линий; установление типов и количества основного и вспомогательного оборудования; определение состава и числа работающих, норм выхода продукции; расчет площадей и планировки автоматизированных цехов; разработка заданий для строительного, сантехнического и энергетического проектирования; разработка заданий на программное обеспечение производства.

Экономические задачи включают: расчет себестоимости и рентабельности выпуска пищевых изделий; определение удельных приведенных затрат, размеров основных и оборотных фондов; составлении калькуляции; решение вопросов финансирования и т.д.

Среди организационных задач следует отметить следующие: разработку структуры управления, выбор принципа формирования структурных подразделений цеха; научную организацию труда и его охраны, документооборот; организацию взаимодействия структурных подразделений, контроль хода производства и управление им и т.д.

По мере увеличения степени автоматизации производственных систем все более преобладающей становится поточная форма организации производственных линий и цехов, которая характеризуется строго определенной последовательностью выполнений операций технологического процесса в каждый момент времени. Такой принцип построения характеризуется высокой производительностью и крупным объемом выпуска изделий.

Вместе с тем, применяется также предметный принцип построения указанных систем, что связано с созданием предметно-специализированных производств (характерных, например, для сыроваренных и кондитерских предприятий). Основным преимуществом такого принципа является повышенная ответственность за выпуск деликатесной продукции высокого качества, короткие материальные потоки и упрощенная структура управления производством.

При значительной номенклатуре готовой продукции эффективен технологический принцип построения элементов пищевых систем, характеризующийся выполнением однотипных операций технологического процесса и использованием однотипного технологического оборудования (например, пивоваренных и ликероводочных заводов). Данный принцип реализуется путем формирования специальных цехов и участков, к преимуществам которых относятся единство системы управления для всех этапов производства, единый уровень требований к качеству полуфабриката и осуществления

промежуточных этапов обработки, упрощение структуры управления благодаря специализации операций.

Заметим, что выбор принципа формирования элементов пищевой системы оказывает большое влияние на синтез ее структуры в целом, т.е. обоснованное определение ее состава. При построении линий и цехов необходимо учитывать ряд ограничений, например, по виду обрабатываемого сырья на технологических позициях, который накладывает определенные требования по сбору и утилизации отходов, по совместимости технологических машин и т.д.

### **Методологические подходы к моделированию гибких пищевых систем**

Известно, что моделирование является средством, позволяющим без капитальных затрат решить проблемы построения эффективных сложных систем, к которым относятся гибкие пищевые системы. При формировании указанных систем важнейшее значение имеют вопросы оптимизации материальных, энергетических и информационных потоков, которые в значительной мере определяют гибкость, мобильность и эффективность таких производств. Решение этих сложных проблем позволит значительно снизить количество вспомогательного оборудования и эксплуатационные расходы на него, повысить коэффициент загрузки оборудования, снизить энергопотребление, повысить оперативность принимаемых решений.

Методологию системного подхода целесообразно проанализировать на примере гибкой производственной системы. Такую систему можно представить как адаптивно-взаимосвязанную систему производства, содержащую множество активных автоматизированных элементов (мехатронное технологическое оборудование, устройства передачи материальных, энергетических и информационных потоков), а также множество связей между ними. Производственный процесс при этом рассматривается как совокупность операций. Производственная операция выполняется над сырьем или полуфабрикатом, представляющими собой элемент вещественного потока, преобразуемого в ходе производственного процесса. Структура вещественного потока, то есть состав и последовательность в потоке его различных элементов, определяет последовательность выполнения производственных операций и структуру производственного процесса.

Выполнение операций предполагает наличие определенных технических средств, которыми являются: технологические машины и агрегаты, аппараты, сменные рабочие органы, приспособления, емкости и др. Таким образом, описание элементов производственного процесса в гибкой производственной системе и моделирование их функционирования сводится к формальному описанию и моделированию технологического оборудования и элементов вещественного потока. Гибкая производственная система характеризуется следующими признаками:

1. Структура системы формируется из конечного множества технологического оборудования (мехатронных машин, транспортно-накопительных средств, холодильных емкостей и т.д.)  $TM \{TM_1; TM_2; TM_3; \dots; TM_{S-1}; TM_S\}$ , образующего линии и реализующего технологические операции. Технологические машины представляют собой структурные элементы производственной системы – агрегаты  $A \{A_1; A_2; A_3; \dots; A_{S-1}; A_S\}$ .

2. Производственная система включает конечное множество структурных связей  $R \{r_1; r_2; r_3; \dots; r_{S-1}; r_S\}$  между агрегатами и внешними системами. Эти связи имеют различный характер и обеспечивают передачу сырья, полуфабрикатов, материалов, рабочих органов, готовых изделий, энергии, а также справочную и управляющую информацию между агрегатами, тем самым обеспечивая функционирование системы.

3. Каждый агрегат в технологической линии имеет вход и выход, служащие соответственно для приема и выдачи сырья, полуфабрикатов и готовых изделий, материалов, энергии и информации.

4. Агрегаты производственной системы функционируют не изолированно друг от друга, а во взаимодействии, при котором состояния одного агрегата зависят от условий, определяемых поведением других.

5. Все технологические операции  $l \in L$  являются конечными по времени.
6. Производственная система функционирует во времени, взаимодействуя с внешней средой, и в каждый момент времени может находиться в одном из возможных состояний  $Z(t)$ .
7. Продолжительность технологических операций  $t_l \{l \in L\}$  по обработке различных полуфабрикатов на различных агрегатах является случайной взаимно независимой величиной.
8. Момент поступления  $i$ -го полуфабриката на  $j$ -й агрегат есть величина случайная.
9. Маршруты обработки полуфабрикатов в гибкой производственной системе есть множество возможных маршрутов  $M \{M_1; M_2; M_3; \dots; M_{S-1}; M_S\}$ .
10. Последовательность запуска сырья для переработки может быть детерминированной или стохастической.

Таким образом, при формализованном описании гибкой производственной системы целесообразно представить ее как множество составляющих агрегатов  $A \{A_1; A_2; A_3; \dots; A_{S-1}; A_S\}$ , между которыми имеют место связи  $R \{r_1; r_2; r_3; \dots; r_{S-1}; r_S\}$ . Такую структуру системы возможно изобразить в виде направленного или ненаправленного графа (рис. 3). Вершины графа обозначают технологическое оборудование (агрегаты), а ребра – отношения, связывающие агрегаты.

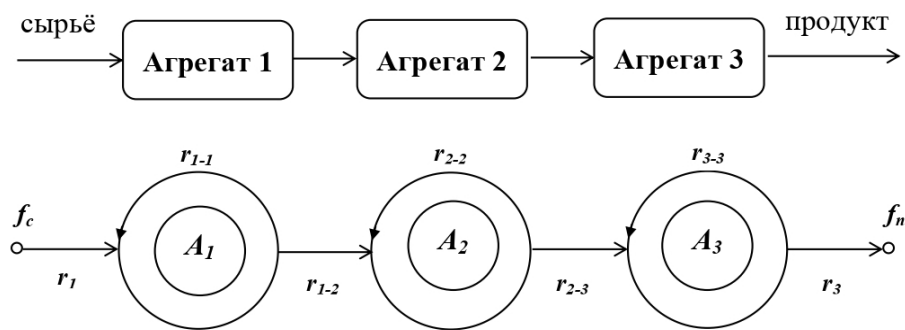


Рисунок 3 – Граф-схема гибкой производственной системы с конвейером

В случае построения производственной системы на основе технологических линий при ее декомпозиции возможно выделить три вида связей:

1. Внешние связи  $R_j \{r_1; r_3\}$ , с помощью которых агрегаты соединяются с другими системами. По внешним связям  $r_1$  поступает сырье  $f_c$  и управляющая информация, по  $r_3$  выдается готовая продукция  $f_n$  и оперативная информация о продуктах переработки.
2. Взаимные связи  $R_{j-k} \{r_{1-2}; r_{2-3}\}$ , которые соединяют агрегаты  $A_1, A_2, A_3$  между собой в прямом и обратном направлениях и которые строятся в соответствии с технологическим процессом.
3. Внутренние связи  $R_{j-j} \{r_{1-1}; r_{2-2}; r_{3-3}\}$  агрегатов, которые обеспечивают связь между входом в устройство и выходом из него.

В результате формируется граф, анализ которого показывает, что параметр агрегата  $A_1$  определяет параметры последующих агрегатов  $A_2, A_3, A_4$ . Таким параметром может являться, например, производительность. Производительность агрегата  $A_1$  определяет производительность последующего агрегата  $A_2$ , который является зависимым от агрегата  $A_1$ . Соответственно производительность агрегата  $A_3$  является зависимой от агрегата  $A_2$  и так далее.

Из вышеизложенного следует, что структура гибкой производственной системы выступает как определенный закон взаимосвязи и отражает детальное описание связей между системными компонентами. Для формального описания структуры системы ее

следует рассматривать как упорядоченную совокупность взаимодействующих агрегатов (технологических машин, аппаратов, транспортно-накопительных средств, контрольно-измерительных устройств, управляющих приспособлений и т.д.), информация о которых является исходной для декомпозиции модели.

Таким образом, для моделирования гибкой производственной системы требуется формализация функционирования технологического оборудования, входящего в ее состав. Такое формальное описание работы технологических машин, транспортных устройств и других приспособлений может быть выполнено на базе положений теории массового обслуживания, что позволяет учесть случайный характер многих производственных факторов. Исходя из этого, агрегаты производственной системы соответствуют одноканальной однофазной системе массового обслуживания (рис. 4) [24, 25].

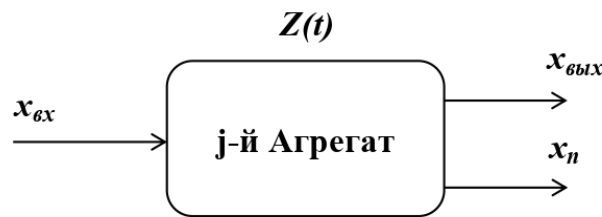


Рисунок 4 – Схема агрегата гибкой производственной системы как элемента системы массового обслуживания

Для любого агрегата параметр  $x_{вх}$  означает сырье, материал, поступающие на обслуживание (обработку, транспортирование, хранение, измерительную операцию и др.), а также управляющую информацию. Параметр  $x_{вых}$  означает изготовленный продукт, полуфабрикат и оперативную информацию для управления. Параметр  $x_n$  означает объекты, не принятые для обслуживания агрегатом, а также соответствующую информацию [26, 27].

Агрегат производственной системы представляет собой элемент, параметры которого линейно меняются между моментами наступления событий. Функционирование оборудования рассматривается как процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем. В общем случае, совокупность функций, выполняемых технологическими машинами и аппаратами при обработке сырья и полуфабрикатов, можно разбить на ряд фаз: прием объекта; его временное хранение в случае занятости агрегата; обработка объекта; хранение обработанного изделия при занятости транспортного средства; передача изделия в транспортную систему; простой агрегата. Аналогичные функции выполняет и транспортная система, а также контрольно-измерительные устройства и промежуточные накопители тары, продукции, материалов.

Это позволяет заключить, что функции агрегатов гибкой производственной системы с точки зрения временных затрат и последовательности их выполнения аналогичны, при этом отличаясь только числовыми характеристиками и структурными признаками по передачам. Работа  $j$ -го агрегата описывается как последовательная смена его состояний в интервале времени  $t_0...t_q$ , причем в каждый момент времени  $t \in (t_0, t_q)$   $j$ -й агрегат характеризуется внутренним состоянием  $Z(t)$ .

Модель обслуживания в гибкой производственной системе можно рассмотреть на примере участка стерилизации консервных изделий. Запросы от технологического потока изделий на их обслуживание системой стерилизации представляют собой поток заявок на выполнение операций тепловой обработки. Обслуживание ведется одним или несколькими тепловыми аппаратами - автоклавами. В условиях поточного производства с широким ассортиментом продукции затраты времени на изготовление готовых изделий носят стохастический характер. Анализ распределения входного потока заявок на обслуживание системой стерилизации практически не позволяет точно предсказать моменты появления и

количество заявок в течение рабочей смены. В связи с этим, поток заявок следует считать случайным.

Количество заявок, поступивших на систему стерилизации после произвольного момента времени, не зависит от количества заявок, поступивших до этого момента. Поскольку имеется независимость потока заявок от числа ранее поступивших заявок и момента времени их поступления, то такой поток возможно считать потоком требований без последствия. Кроме того, в любой момент времени на систему стерилизации может поступить одна заявка после автоматического заполнения автоклавной корзины укладчиком, вероятность одновременного поступления двух и более заявок мала. Таким образом, поток заявок можно считать ординарным. Поскольку вероятность поступления определенного числа заявок в течение заданного промежутка времени не зависит от начала отсчета, а является функцией длительности этого промежутка, то есть основания считать поток заявок стационарным.

В результате, рассмотренный поток заявок на обслуживание системой стерилизации одновременно обладает свойствами стационарности, отсутствием последствия и ординарности. Характеристикой такого потока является интенсивность поступления заявок в систему, которая равна математическому ожиданию числа заявок, поступивших на систему стерилизации за единицу времени:

$$\lambda = \sum_{j=1}^s \lambda_j \cdot P_j(t), \quad (1)$$

где  $\lambda_j$  – число заявок от  $j$ -го агрегата-укладчика, поступивших в систему стерилизации за время  $t_0 \dots t_q$ ;  $P_j(t)$  – вероятность поступления заявок за время  $t_0 \dots t_q$ ;  $s$  – число агрегатов-укладчиков.

Среднее количество заявок  $\lambda$ , поступившее в систему стерилизации за единицу времени определяется производительностью отдельных технологических машин в линии. Для простейшего потока с интенсивностью  $\lambda$  интервал между соседними событиями имеет распределение с плотностью:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} (t > 0). \quad (2)$$

Таким образом, моделирование потока заявок в гибкой производственной системе пищевого производства можно проводить с позиций теории массового обслуживания. Такой анализ позволяет определить требуемую производительность и коэффициент использования системы стерилизации консервной продукции, среднее время ожидания обслуживания, среднюю длину очереди заявок, коэффициент использования укладчиков, конструктивные, технологические, эксплуатационные отказы машин и другие важные параметры технологических линий. Если проанализированы входные потоки заявок и алгоритмы обслуживания технологического оборудования, то это дает основу для построения математической модели гибкой производственной системы в целом.

### **Заключение**

Системные исследования в области пищевых систем позволяют улучшить качество продуктов питания и удовлетворить потребности населения в здоровой и безопасной пище. Результаты совершенствования указанных систем создают основу для разработки новых технологий производства продуктов питания, улучшают управление цепочками поставок, хранение и транспортировку продуктов, а также повышают осведомленность потребителей о здоровом питании и стандартах качества продуктов.

Одним из перспективных направлений совершенствования пищевых систем является их математическое моделирование на базе теории графов и теории систем массового обслуживания. Это позволяет рассчитывать характеристики указанных систем,

определяющие закономерности их функционирования, с учетом стохастического характера ряда ключевых производственных факторов.

Наличие математических моделей пищевых систем создает основу для эффективной реализации алгоритмического и параметрического этапов их проектирования, на которых производится анализ материальных, информационных и энергетических потоков подсистем.

Дальнейшим направлением исследований является анализ методологических подходов к синтезу гибких пищевых систем на основе имитационного моделирования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фатыхов Ю.А., Агеев О.В., Поляков Р.К., Наумов В.А., Воробьев В.И. Разработка производственных систем пищевых производств // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2022. № 4. С. 413-427.
2. Amiri A., Mehrjerdi Y.Z., Jalalimanesh A., Sadegheih A. Food system sustainability investigation using system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 277, ID124040.
3. Freedman D.A., Clark J.K., Lounsbury D.W. et. al. system dynamics structuring nutrition equity in racialized urban neighborhoods. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2022. Vol. 115, Iss. 4, pp. 1027-1038.
4. Zou T., Dawodu A., Mangi E., Cheshmehzangi A. General limitations of the current approach in developing sustainable food system frameworks. *Global Food Security*. 2022. Vol. 33, ID 100624.
5. Deng Y., Shi Y., Huang Y., Xu J. An optimization approach for food waste management system based on technical integration under different Water/Grease proportions. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 394, ID 136254.
6. Pérez-Neira D., Schneider M., Esche L., Armengot L. Sustainability of food security in different cacao production systems: A land, labour, energy and food quality nexus approach. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 190, ID 106874.
7. Gebrai Y., Ghebremichael K., Mihelcic J.R.. A systems approach to analyzing food, energy, and water uses of a multifunctional crop: A review. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 791, ID 148254.
8. Алексеева Т.В., Калгина Ю.О., Бокарев Д.А. и др. Управление качеством пищевых обогащающих систем из отечественного сырья // *Природные системы и ресурсы*. 2018. Т. 8. № 2. С. 37-41.
9. Панфилов В.А. Формализация инновационных процессов развития техники пищевых технологий // *Известия КГТУ*. 2017. № 44. С. 143-149.
10. Ураков О.А. Развитие техники пищевых производств: диаграммы развития форм организации производственных систем // *Пищевая промышленность*. 2010. № 9. С. 8-11.
11. Карачаева З.А., Исмаилова А.А. Развитие пищевой промышленности в современных экономических условиях // *Экономика и социум*. 2022. № 11-2 (102). С. 438-441.
12. Troise C., Tani M., Dinsmore J., Schiuma G. Understanding the implications of equity crowdfunding on sustainability-oriented innovation and changes in agri-food systems: Insights into an open innovation approach. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 171, ID 120959.
13. Говорова Н.В. Продовольственная безопасность и инновации // *Научно-аналитический вестник Института Европы РАН*. 2018. № 4. С. 131-135.
14. Балыхин М.Г., Благовещенский И.Г., Борзов А.Б. Архитектура и основная концепция создания интеллектуальной экспертной системы контроля качества пищевой продукции // *Пищевая промышленность*. 2017. № 11. С. 60-63.

15. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M. et al. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife. *Materials*, 2022, Vol. 15, ID 289.
16. Агеев О.В., Самойлова Н.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А., Зубков О.А. Математическое моделирование сил сопротивления при резании рыбы дисковым ножом // Научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2021. № 4(50). С. 46-58.
17. Stachnik M., Sterczyńska M., Smarzewska E. et al. Rheological Properties of Industrial Hot Trub. *Materials*. 2021. Vol. 14, ID 7162.
18. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А. Математическое моделирование сил полезного сопротивления при резании охлажденных пищевых продуктов // Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 70-82.
19. Martindale W., Duong L., Hollands T.Æ., Swainson M. Testing the data platforms required for the 21st century food system using an industry ecosystem approach. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 724, ID 137871.
20. Kugelberg S., Bartolini F., Kanter D.R. et al. Implications of a food system approach for policy agenda-setting design. *Global Food Security*. 2021. Vol. 28, ID 100451.
21. Viaggi D., Barrera C., Castelló M.L. et al. Education for innovation and entrepreneurship in the food system: the Erasmus+BoostEdu approach and results. *Current Opinion in Food Science*. 2021. Vol. 42, pp. 157-166.
22. Matsumoto T., Chen Y., Nakatsuka A., Wang Q. Research on horizontal system model for food factories: A case study of process cheese manufacturer. *International Journal of Production Economics*. 2020. Vol. 226, ID 107616.
23. Puech T., Stark F. Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023. Vol. 344, ID 108300.
24. Jahani H., Gholizadeh H. A flexible closed loop supply chain design considering multi-stage manufacturing and queuing based inventory optimization. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55, Iss. 10, pp. 1325-1330.
25. Petrović A., Nikolić M., Bugarić U et al. Controlling highway toll stations using deep learning, queuing theory, and differential evolution. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 119, ID 105683.
26. Chen J., Zhang H., Chen Q. et al. Performance analysis of flexible flow shop with parallel manufacturing cells. *Computers & Industrial Engineering*. 2022. Vol. 173, ID 108739.
27. Fedorenko V., Fedorenko I., Sukmanov A. et al. Modeling of data acquisition systems using the queueing theory. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. 2017. Vol. 74, pp. 83-87.

## REFERENCES

1. Fatyhov Yu.A., Ageev O.V., Polyakov R.K., Naumov V.A., Vorob'ev V.I. *Razrabotka produkcionnyh sistem pishchevyh proizvodstv* [Development of production systems for food production]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2022. No. 4, pp. 413-427.
2. Amiri A., Mehrjerdi Y.Z., Jalalimanesh A., Sadegheih A. Food system sustainability investigation using system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 277, ID124040.
3. Freedman D.A., Clark J.K., Lounsbury D.W. et al. system dynamics structuring nutrition equity in racialized urban neighborhoods. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2022. Vol. 115, Iss. 4, pp. 1027-1038.

4. Zou T., Dawodu A., Mangi E., Cheshmehzangi A. General limitations of the current approach in developing sustainable food system frameworks. *Global Food Security*. 2022. Vol. 33, ID 100624.
5. Deng Y., Shi Y., Huang Y., Xu J. An optimization approach for food waste management system based on technical integration under different Water/Grease proportions. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 394, ID 136254.
6. Pérez-Neira D., Schneider M., Esche L., Armengot L. Sustainability of food security in different cacao production systems: A land, labour, energy and food quality nexus approach. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 190, ID 106874.
7. Gebrai Y., Ghebremichael K., Mihelcic J.R.. A systems approach to analyzing food, energy, and water uses of a multifunctional crop: A review. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 791, ID 148254.
8. Alekseeva T.V., Kalgina Yu.O., Bokarev D.A. et. al. *Upravlenie kachestvom pishchevyh obogashchayushchih sistem iz otechestvennogo syr'ya* [Quality management enriching food systems from domestic raw materials]. *Prirodnye sistemy i resursy*. 2018. Vol. 8, No. 2, pp. 37-41.
9. Panfilov V.A. *Formalizatsiya innovacionnyh processov razvitiya tekhniki pishchevyh tekhnologij* [Formalization of innovative processes for the progress of food technology]. *Izvestiya KGTU*. 2017. No. 44, pp. 143-149.
10. Urakov O.A. *Razvitie tekhniki pishchevyh proizvodstv: diagrammy razvitiya form organizatsii proizvodstvennyh sistem* [Development of food production technology: diagrams of the development of organization forms of production systems]. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2010. No. 9, pp. 8-11.
11. Karachayeva Z.A., Ismailova A.A. *Razvitie pishchevoj promyshlennosti v sovremennykh ekonomicheskikh usloviyakh* [The progress of the food industry in modern economic conditions] // *Ekonomika i socium*. 2022. No. 11-2 (102), pp. 438-441.
12. Troise C., Tani M., Dinsmore J., Schiuma G. Understanding the implications of equity crowdfunding on sustainability-oriented innovation and changes in agri-food systems: Insights into an open innovation approach. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 171, ID 120959.
13. Govorova N.V. *Prodoval'stvennaya bezopasnost' i innovatsii* [Food security and innovations]. *Nauchno-analiticheskiy vestnik Instituta Evropy RAN*. 2018. No. 4, pp. 131-135.
14. Balyhin M.G., Blagoveshchenskiy I.G., Borzov A.B. *Arhitektura i osnovnaya koncepciya sozdaniya intellektual'noj ekspertnoj sistemy kontrolya kachestva pishchevoj produkcii* [Architecture and main concept of creating an intelligent expert system for food quality control]. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2017. No. 11, pp. 60-63.
15. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M. et. al. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife. *Materials*, 2022, Vol. 15, ID 289.
16. Ageev O.V., Samojlova N.V., Naumov V.A. et. al. *Matematicheskoe modelirovanie sil soprotivlenij pri rezanii ryby diskovym nozhom* [Theoretical simulation of resistance forces during fish cutting by circular knife]. *Nauchnyj zhurnal Sankt-Peterburgskogo nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. Seriya: Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv*. 2021. No. 4(50), pp. 46-58.
17. Stachnik M., Sterczyńska M., Smarzewska E. et. al. Rheological Properties of Industrial Hot Trub. *Materials*. 2021. Vol. 14, ID 7162.
18. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatyhov Yu.A. *Matematicheskoe modelirovanie sil poleznogo soprotivleniya pri rezanii ohlazhdennyh pishchevyh produktov* [Mathematical simulation of effective resistance forces during cutting of chilled food products]. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2020. No. 3, pp. 70-82.
19. Martindale W., Duong L., Hollands T.Æ., Swainson M. Testing the data platforms required for the 21st century food system using an industry ecosystem approach. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 724, ID 137871.



20. Kugelberg S., Bartolini F., Kanter D.R. et. al. Implications of a food system approach for policy agenda-setting design. *Global Food Security*. 2021. Vol. 28, ID 100451.

21. Viaggi D., Barrera C., Castelló M.L. et. al. Education for innovation and entrepreneurship in the food system: the Erasmus+BoostEdu approach and results. *Current Opinion in Food Science*. 2021. Vol. 42, pp. 157-166.

22. Matsumoto T., Chen Y., Nakatsuka A., Wang Q. Research on horizontal system model for food factories: A case study of process cheese manufacturer. *International Journal of Production Economics*. 2020. Vol. 226, ID 107616.

23. Puech T., Stark F. Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023. Vol. 344, ID 108300.

24. Jahani H., Gholizadeh H. A flexible closed loop supply chain design considering multi-stage manufacturing and queuing based inventory optimization. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55, Iss. 10, pp. 1325-1330.

25. Petrović A., Nikolić M., Bugarić U et al. Controlling highway toll stations using deep learning, queuing theory, and differential evolution. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 119, ID 105683.

26. Chen J., Zhang H., Chen Q. et al. Performance analysis of flexible flow shop with parallel manufacturing cells. *Computers & Industrial Engineering*. 2022. Vol. 173, ID 108739.

27. Fedorenko V., Fedorenko I., Sukmanov A. et. al. Modeling of data acquisition systems using the queueing theory. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. 2017. Vol. 74, pp. 83-87.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Агеев Олег Вячеславович* – доктор технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: [oleg.ageev@klgtu.ru](mailto:oleg.ageev@klgtu.ru))

*Лизоркина Ольга Анатольевна* – заведующий лабораторией, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: [olga.lizorkina@klgtu.ru](mailto:olga.lizorkina@klgtu.ru))

*Самойлова Наталья Владимировна* – инженер-проектировщик, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: [procyon@mail.ru](mailto:procyon@mail.ru))

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Ageev Oleg Viatcheslavovich* – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: [oleg.ageev@klgtu.ru](mailto:oleg.ageev@klgtu.ru))

*Lizorkina Olga Anatoljevna* – Head of laboratory, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: [olga.lizorkina@klgtu.ru](mailto:olga.lizorkina@klgtu.ru))

*Samojlova Natalia Vladimirovna* – Design engineer, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: [procyon@mail.ru](mailto:procyon@mail.ru))

Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 25.05.2023, принята к публикации 01.06.2023.

The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 25.05.2023; accepted for publication 01.06.2023.