

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ

*Каповский Б.Р., Никитина М.А., Дыдыкин А.С., Деревицкая О.К.,
Пчелкина В.А.*

*Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова
Российской академии наук, Москва*

Ключевые слова: интеллектуальное управление, «умное производство», «цифровой двойник» технологического процесса, эволюционное моделирование проектирования продукта, специализированные мясные продукты, детское питание, геродиетическое питание.

Аннотация. В статье рассмотрена структура интеллектуальной системы управления производством специализированных мясных продуктов. Предложена комплектация линии поточного производства специализированных мясных продуктов с «точками приложения» компьютерного моделирования основных технологических процессов, включающая входной контроль сырья по обнаружению посторонних включений. Предложенное интеллектуальное управление производственным процессом позволит получать мясную продукцию заданного качества при повышении экономических показателей производства.

COMPUTER MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE PRODUCTION OF SPECIALIZED MEAT PRODUCTS

Kapovsky B.R., Nikitina M.A., Dydykin A.S., Derevitskaya O.K., Pchelkina V.A.

*Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbato
of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

Keywords: intelligent control, «smart production», «digital twin» of the technological process, evolutionary modeling of product design, specialized meat products, baby food, and geriatric nutrition.

Abstract. The article discusses the structure of an intelligent production management system for specialized meat products. It proposes a set-up for the flow production of specialized meat products with "application points" for computer modeling of the main technological processes, including input control of raw materials for the detection of foreign inclusions. The proposed intelligent production management will allow for the production of meat products of the specified quality while improving the economic performance of production.

В Указе Президента РФ от 28.02.2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» отмечается, что необходим переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений и высокопроизводительных вычислительных систем, результатов обработки больших объемов данных и технологий машинного обучения и искусственного интеллекта. В соответствии с Указом Президента РФ от 18.06. 2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» к важнейшим наукоемким технологиям относят технологии персонализированного, лечебного и функционального питания для здоровьесбережения населения. Таким образом, проектирование и создание высокотехнологичной специализированной

мясной продукции является актуальной задачей для отечественной мясной промышленности.

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией, специализированные мясные продукты должны иметь заданную пищевую ценность, обусловленную, прежде всего, физиологическими потребностями организма. Однако параметры химического состава сырья животного происхождения являются интервальными величинами, что затрудняет выполнение требований нормативных документов при поточном производстве мясной продукции. При производстве специализированной мясной продукции регламентировано содержание белка, жира и влаги, обеспечивающее заданный состав готовой продукции. В частности, мясные полуфабрикаты для питания детей дошкольного и школьного возраста должны содержать не менее 10 г белка, а жира – не более 20 г на 100 г продукта; колбасные изделия – белка не менее 12 г, жира не более 22 г на 100 г продукта; паштеты и кулинарные изделия – белка не менее 8 г, жира не более 16 г на 100 г продукта [1]. В составе продуктов геродиетического назначения должно быть выдержано соотношение белков:жиров:углеводов, как 1,0:0,8:3,5. Для людей пожилого (61-74 года) и преклонного (75 лет и старше) возраста потребность в белках равна 80 г в сутки, причем 60% белков должно быть животного происхождения. Потребность в жирах находится в пределах 75-85 г в сутки [2]. Отсюда возникает задача поддержания заданного химического состава и энергетической ценности производимой специализированной мясной продукции, определяющих её качество.

Нормативной документацией на ряд специализированных мясных продуктов регламентируется дисперсность мясного компонента. Это требование обуславливается особенностями работы пищеварительного тракта у детей и лиц пожилого и преклонного возрастов. В частности, у потребителей продуктов геродиетического назначения в процессе старения организма подвергается изменению жевательный аппарат и пищеварительная система. В литературе отмечается [2, 3], что с возрастом снижается секреторная и моторная функции желудка, слизистая оболочка желудка становится тоньше. Снижается уровень кислотности желудочного сока, вследствие этого в микрофлоре появляются гнилостные микроорганизмы. В поджелудочной железе уменьшается количество активных ферментов. В этой связи к геродиетическим продуктам предъявляются требования по сбалансированности химического состава, легкой пережевываемости и высокой переваримости. Следовательно, актуальна задача обеспечения заданной степени измельчения исходного мясного сырья с учетом его неоднородности по структурному и текстурному признакам.

При разработке продуктов питания детей раннего возраста должны быть учтены особенности физиологии детского организма. У детей первого года жизни в ротовой полости пища почти не измельчается, поэтому она должна поступать в тонкоизмельченном виде, что обеспечивает *«механическое щажение»*. Поддержание заданной технологическими требованиями степени измельчения исходного мясного сырья способствует максимальной абсорбции ферментов пищеварительных соков на частицах продукта, в результате чего облегчается и ускоряется переваривание пищи.

Для решения сформулированных выше задач, авторы предлагают «умное производство» [4] специализированных мясных продуктов на основе интеллектуальной системы управления (ИСУ) технологическими процессами с использованием компьютерного моделирования. На рисунке 1 показана комплектация линии поточного производства специализированных мясных продуктов с «точками приложения» компьютерного моделирования основных технологических процессов, реализуемых в указанном производстве. К таковым процессам следует отнести измельчение исходного сырья в виде замороженных мясных блоков с использованием одностадийного измельчителя (позиция 3 на рис. 1), а также процесс составления мясного продукта с заданной пищевой ценностью в мешалке, комплектующей линию (5, рис. 1). Важнейшей операцией в предлагаемом технологическом решении является определение химического состава измельченного мясного сырья, загружаемого в мешалку, в потоке в режиме реального времени производства (измерительное устройство 7 на рисунке 1).

Компьютерное моделирование процесса измельчения осуществляют с помощью «цифрового двойника» процесса, разработанного авторами [5]. Прогноз размера частиц измельченного мяса является результатом статистического анализа в имитационном моделировании одностадийного измельчения сырья в «виртуальном» пространстве «цифрового двойника» процесса измельчения. В традиционном производстве мясных консервов для питания детей раннего возраста, после обработки мясного сырья в пароконтактном бланширователе при измельчении получают размеры частиц мяса в диапазоне $(0,5-0,8) \cdot 10^{-3}$ м. При повторном измельчении (гомогенизатор и др.) размеры частиц мяса уменьшаются до $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ м [1]. При одностадийном измельчении (за один проход) мясного сырья (говядина) математическое ожидание размера частиц мяса, полученное в результате статистического анализа продукта измельчения, составляет $0,42 \cdot 10^{-3}$ м [5].

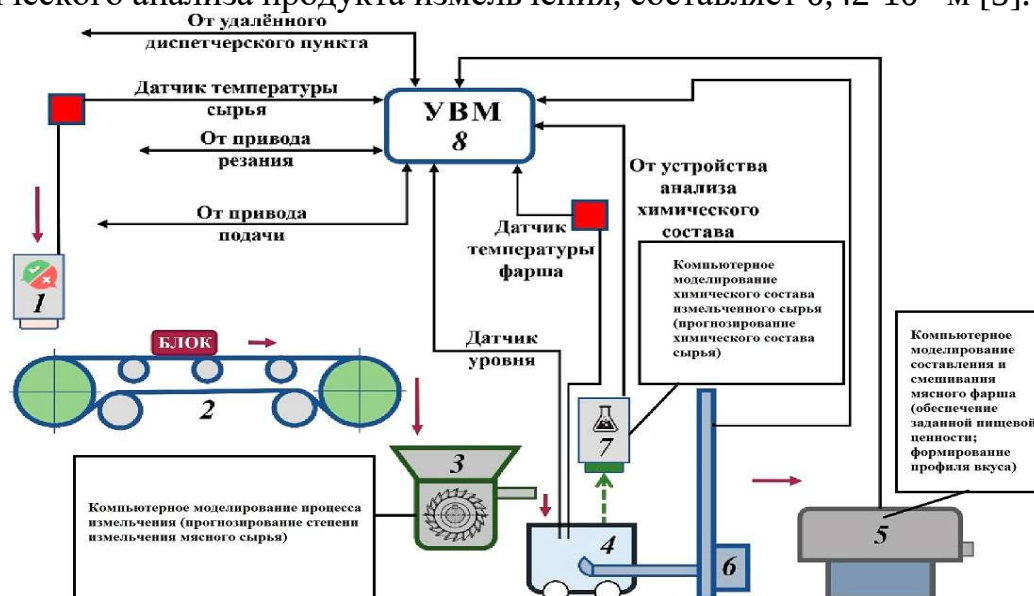


Рис. 1. Комплектация линии поточного производства специализированных мясных продуктов с «точками приложения» компьютерного моделирования основных технологических процессов: 1 – устройство входного контроля сырья; 2 – конвейер-питатель; 3 – одностадийный измельчитель; 4 – напольная тележка; 5 – мешалка; 6 – подъемник; 7 – измерительное устройство химического состава сырья; 8 – управляющая вычислительная машина (промышленный компьютер)

Одностадийное измельчение сырья, предлагаемое в проекте, характеризуется сокращением технологической цепочки производства мясных фаршей и консервных масс за счет сокращения парка мясорезательных машин (вместо трех машин – блокорежки, волчка, куттера – применяется один одностадийный измельчитель, обеспечивающий заданную степень измельчения сырья). Это приводит к экономии ресурсов и, следовательно, к снижению себестоимости производимой мясной продукции. Кроме того, ИСУ поддерживает режим резания мяса (скорость резания, скорость подачи сырья на режущий многолезвийный инструмент), оптимальный для данной температуры мяса, что приводит к экономии электроэнергии, затрачиваемой на процесс измельчения сырья [6]. Так как мясные продукты характеризуются высокой ценой на товарных рынках, то снижение себестоимости их производства имеет важное социальное значение с учетом сплошного машинного контроля качества продукции.

Прогноз химического состава измельченного сырья в потоке в режиме реального времени течения технологического процесса вычисляется нечеткой нейронной сетью (ANFIS – Adaptive Network Based Inference System; TSK – Takagi, Sugeno, Kanga, [7]). В качестве измерительного устройства параметров химического состава (7 на рисунке 1) предполагается использовать систему спектрального анализа ProFoss – потоковый ИК-анализатор для мяса и фарша [8]. Анализатор встраивается непосредственно в конвейер-питатель технологической линии (рис. 1) и имеет соответствующее климатическое исполнение. Измерительная система работает в ближнем ИК-диапазоне (850-1050 нм) и выдает результаты анализа измерений в течение 3-15 с. Расчеты показывают [9], что время одностадийного измельчения мясных блоков промышленных типоразмеров составляет 20-25 с в расчете на один блок в зависимости от его размеров. Таким образом, технически возможно получить дистанционно информацию о химическом составе сырья в объеме каждого мясного блока, перерабатываемого на технологической линии, без остановки производства в режиме реального времени. Далее полученная информация обрабатывается нечеткой нейронной сетью при расчете прогноза химического состава сырья, загружаемого в мешалку. Указанный расчет ведется как анализ временного ряда результатов измерений параметров химического состава, представленных с учетом их интервального характера как входных параметров нечеткой нейронной сети.

Многокритериальная оптимизация составления мясного продукта заданных свойств и состава при управлении производственным процессом в режиме реального времени проводится с использованием генетического алгоритма. В результате эволюционного моделирования определяется субоптимальный вариант состава мясного продукта, обладающего заданной пищевой ценностью при минимуме расхода мясного сырья. Так как именно стоимость сырья определяет «львиную» долю себестоимости вырабатываемой мясной продукции, то экономия по этой статье расходов предприятия имеет решающее значение.

На рисунке 1 позицией 1 представлен детектор посторонних включений в мясном сырье (входной контроль сырья). Авторы полагают целесообразным поручить эту работу искусственной нейронной сети как решение задачи распознавания образа – самой «старой» задачи в технических приложениях нейросетей [7]. В технологическом процессе одностадийного измельчения блочного

мяса, срабатывание блоков ведется послойно, при последовательной подаче сырья на режущий вал измельчителя. В случае обнаружения детектором постороннего включения в сырье, есть возможность продолжить процесс измельчения в зависимости от места расположения включения в блоке мяса (рис. 2).

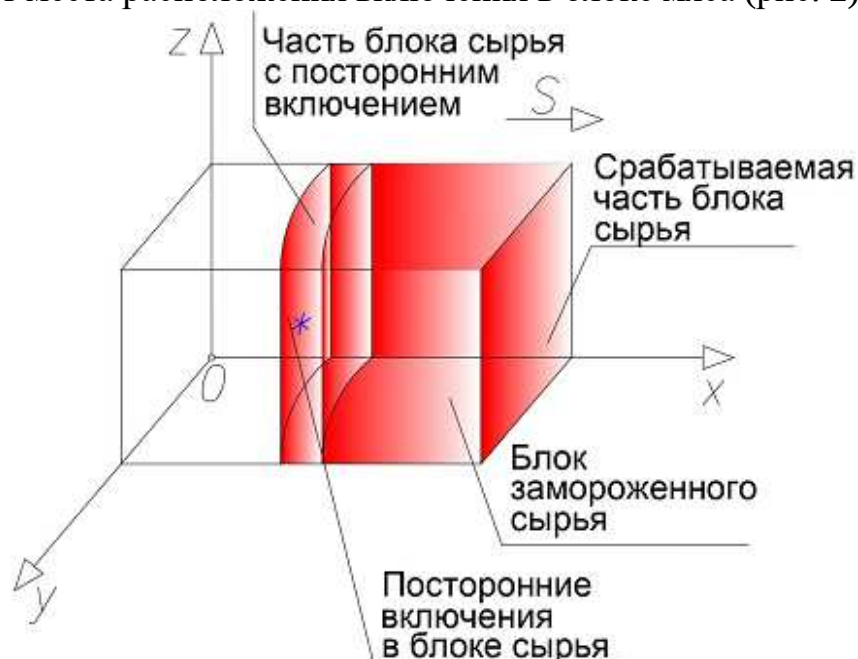


Рис. 2. Схема работы входного устройства контроля сырья по обнаружению постороннего включения в блоке замороженного мяса

Контрольная система определяет текущую координату перемещения штока механизма подачи измельчителя в технологической системе «измельчитель – блок мяса», и прекращает подачу сырья при достижении «зоны безопасности» [10]. Наличие указанной «зоны безопасности» исключает возможность попадания постороннего предмета в дальнейшую переработку мясного сырья. В то же время, частичная переработка блока мяса до расположения «зоны безопасности» позволяет повысить экономическую эффективность производства – повышается степень использования сырья. Кроме того, облегчается работа по дальнейшей локализации постороннего включения, так как нет необходимости дополнительно располагать отбракованный некондиционный блок в контрольной системе для точного определения местонахождения включения. Достаточно отделить, например ручным инструментом (пилой), слой мяса, по толщине равный ширине «зоны безопасности», считая от характерной поверхности резания мясного блока. Отметим, что стандартное технологическое решение предусматривает безусловную отбраковку всего блока мяса в независимости от места расположения включения.

Предлагаемое компьютерное моделирование технологических процессов производства специализированных мясных продуктов осуществляется в среде модельно-ориентированного проектирования и программирования Engae, разработанной в РФ. Вся информация обрабатывается ИСУ в режиме реального времени производства продукции с коррекцией параметров технологических процессов с целью получения мясного продукта заданного качества.

На рисунке 3 представлена схема ИСУ производством специализированных мясных продуктов.

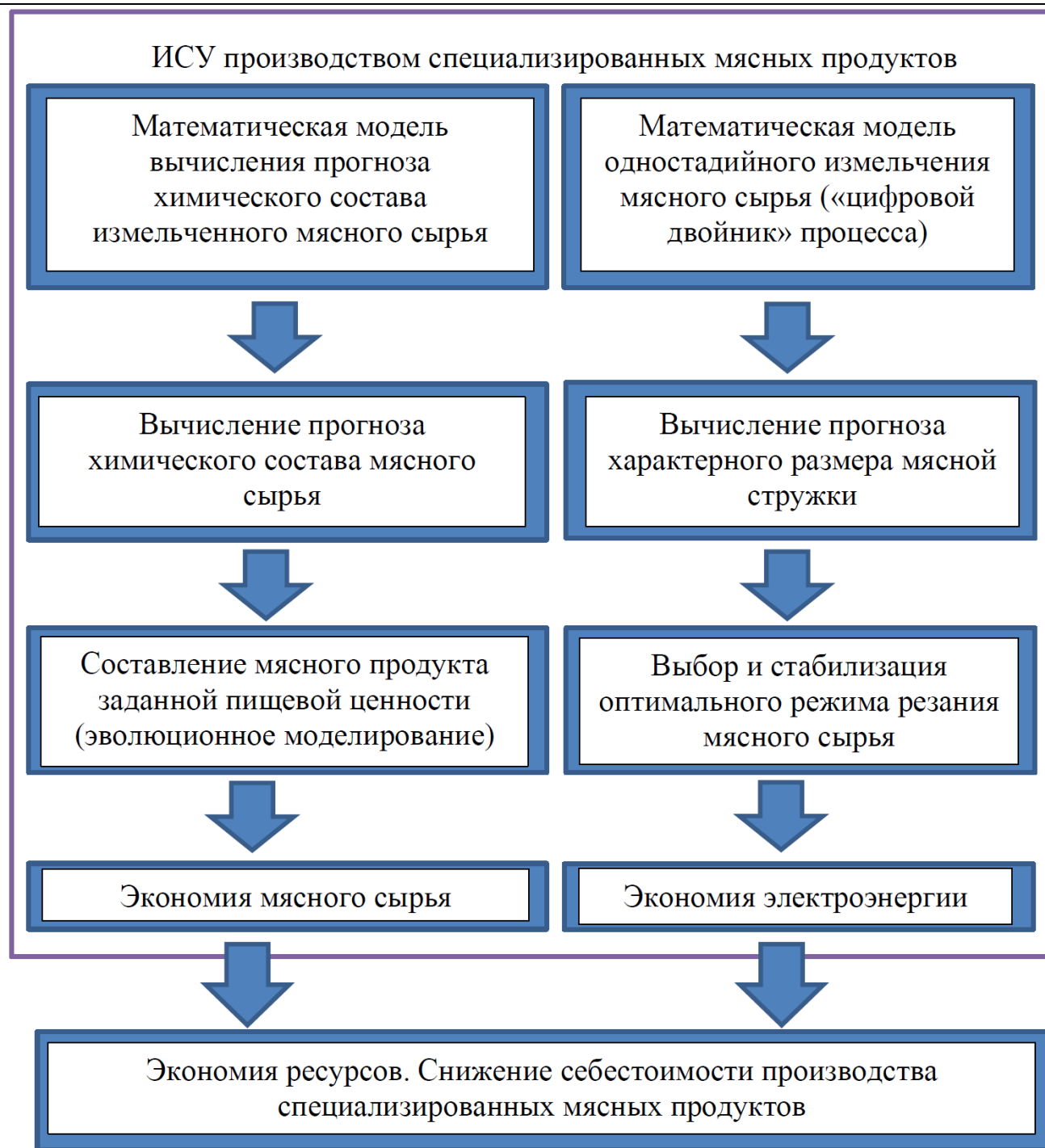


Рис. 3. Структура ИСУ производством специализированных мясных продуктов

Цель предлагаемого интеллектуального управления – получить мясной продукт заданного качества при повышении экономических показателей производства. Интеллектуальное управление производством специализированной продукции заданных свойств и состава в условиях её поточного производства при переработке сельскохозяйственного сырья животного происхождения, является новым знанием. Это знание может быть использовано в производстве продуктов питания различного назначения. Исходя из доктрины Парацельса, нельзя указать четкую разделительную черту между медицинскими препаратами и пищевыми продуктами. Для специализированного питания это тем более справедливо, учитывая необходимость соблюдения жестких медико-биологических требований к этой категории пищевой продукции. Питание детей и их дедушек-бабушек

сродни приему медицинских препаратов, обеспечивающих здоровье и долголетие. А производство точных по составу и свойствам специализированных продуктов-«медикаментов» является высокой социальной задачей современных производителей продовольствия, работающих в условиях нового технологического уклада, Индустрия 4.0.

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по Государственному заданию № FGUS-2024-0003 ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

Список литературы

1. Устинова А.В., Тимошенко Н.В. Продукты для детского питания на основе мясного сырья. – М.: Изд-во ВНИИМП, 2003. – 438 с.
2. Касьянов Г.И. Особенности конструирования рецептур продуктов геродиетического питания // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2016. – №10. – С. 174-186.
3. Жукова А.Ю. Функциональное и специализированное питание – ключ к улучшению здоровья населения // Всё о мясе. – 2017. – №6. – С.32-33.
4. Афанасьев А.А. Цифровая трансформация промышленного производства: теоретические аспекты и политика её реализации. Научный доклад. – М.: ИЭ РАН, 2024. – 76 с.
5. Kapovsky B., Nikitina M., Pchelkina V., Chernukha I., Lisitsyn A.. The concept of intelligent control system for mincing meat with specified dispersion // Meat Technology. 2025, special issue 66/3. doi.org/10.18485/meattech.2025.66.3.79.
6. Каповский Б.Р., Пчелкина В.А., Дыдыкин А.С. Применение нечеткой и четкой математических моделей в гибридном управлении процессом одностадийного измельчения замороженного мясного сырья // Инженерные технологии и системы. – 2023. – Т. 33, №4. – С. 558-584. – doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.558-584.
7. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
8. Анализатор мяса MeatMaster II [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://foss.su/meatmaster-2>.
9. Ивашов В.И., Каповский Б.Р., Пляшешник П.И., Пчелкина В.А., Исакова Е.Л., Нурмуханбетова Д.Е. Математическое моделирование одностадийного измельчения продуктов, замороженных в виде блоков // Известия НАН РК. Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева. Серия Геологии и технических наук. – 2018. – №5(431). – С. 48-65.
10. Kapovsky B., Plyasheshnik P., Stefanova Intelligent data analysis in an automated system of input control of raw materials on a continuous process line for the production of meat products // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 419, p. 02006. doi.org/10.1051/e3sconf/202341902006.

Сведения об авторах:

Каповский Борис Романович – к.т.н., научный сотрудник отдела функционального и специализированного питания;

Никитина Марина Александровна – д.т.н., ведущий научный сотрудник центра экономико-аналитических исследований и информационных технологий;

Дыдыкин Андрей Сергеевич – д.т.н., доцент, заведующий отделом функционального и специализированного питания;

Деревицкая Ольга Константиновна – к.т.н., ведущий научный сотрудник отдела функционального и специализированного питания;

Пчелкина Виктория Александровна – к.т.н., ведущий научный сотрудник экспериментальной клиники-лаборатории биологически активных веществ животного происхождения.