

Обзор современных тенденций в моделировании процессов происходящих при обработке пищевых продуктов

Ломакина П.А., Фролов Д.И.

Аннотация. В статье дан обзор современных принципов и технологий моделирования процессов, происходящих при приготовлении и обработке пищевых продуктах, в процессе которых происходят изменение объема и деформация. Такие явления являются результатом сложных и динамических взаимосвязей между составом и структурой пищевых продуктов и движущими силами, определяемыми процессами и условиями эксплуатации. Ключевую роль в качестве пластификатора играет вода, сильно влияющая на состояние аморфных материалов через стеклование на их механические свойства. Поэтому важно улучшить понимание этих сложных явлений и разработать полезные инструменты прогнозирования. Для этой цели в области пищевой инженерии применялись различные подходы к моделированию. В работе рассматриваются эмпирические и физические модели, а также различные движущие силы деформации, чтобы определить общие узкие места и проблемы в приложениях пищевой промышленности.

Ключевые слова: моделирование, мультифизика, пористость, механика, текстура, вязкоупругий материал.

Для цитирования: Ломакина П.А., Фролов Д.И. Обзор современных тенденций в моделировании процессов происходящих при обработке пищевых продуктов // Инновационная техника и технология. 2023. Т. 10. № 1. С. 73–80.

Overview of current trends in the modeling of processes occurring in the processing of food products

Lomakina P.A., Frolov D.I.

Abstract. The article provides an overview of modern principles and technologies for modeling processes occurring during the preparation and processing of food products, during which volume changes and deformation occur. Such phenomena are the result of complex and dynamic relationships between the composition and structure of foods and driving forces determined by processes and operating conditions. The key role as a plasticizer is played by water, which strongly affects the state of amorphous materials through vitrification on their mechanical properties. Therefore, it is important to improve understanding of these complex phenomena and develop useful forecasting tools. For this purpose, various modeling approaches have been applied in the field of food engineering. The paper examines empirical and physical models, as well as various strain drivers, to identify common bottlenecks and problems in food processing applications.

Keywords: modeling, multiphysics, porosity, mechanics, texture, viscoelastic material.

For citation: Lomakina P.A., Frolov D.I. Overview of current trends in the modeling of processes occurring in the processing of food products. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2023. Vol. 10. No. 1. pp. 73–80. (In Russ.).

Введение

Во многих процессах, связанных с пищевыми продуктами, в продуктах происходят значительные изменения объема и большая деформация. Типичные примеры: усадка фруктов и овощей во время конвективной сушки и мясных продуктов во время

приготовления, расширение хлеба во время выпекания, расширение при экструзии. В некоторых случаях эти явления являются положительными и действительно являются характерной чертой процесса, например, расширение при выпечке и экструзии. С другой стороны, они могут представлять собой нежелательные изменения в других ситуаци-

ях, например, чрезмерную усадку во время сушки и приготовления пищи. Однако в любом случае для широкого круга процессов, условий эксплуатации и пищевых материалов значительное изменение объема и деформация являются частью процессов и, таким образом, неизбежны. Следовательно, необходимо лучше понять фундаментальные механизмы этих явлений в контексте пищевой инженерии, то есть развивать научные знания и полезные инструменты для описания и прогнозирования взаимосвязей между условиями обработки и поведением пищевых материалов. Основная цель состоит в том, чтобы направить такие явления на разработку пищевых процессов, которые достигают множества целей, включая безопасность и качество пищевых продуктов (питательных и сенсорных), а также эффективность процесса. В этом смысле численное моделирование может сыграть важную роль, предоставляя адекватные рамки и количественные инструменты для систематического и надежного анализа. Существует потребность в лучшем понимании фундаментальных механизмов этих явлений в контексте пищевой инженерии, то есть в развитии научных знаний и полезных инструментов для описания и прогнозирования взаимосвязей между условиями обработки и поведением пищевых материалов.

Возникновение и развитие изменения объема и деформации пищевых продуктов во время обработки можно объяснить, учитывая как свойства материала, так и движущие силы, устанавливаемые данным процессом и условиями эксплуатации, как и в других транспортных явлениях. С одной стороны, большинство пищевых продуктов признаются очень сложными биоматериалами, их можно описать либо как многофазные смешанные дисперсные системы, либо как многофазные капиллярно-пористые среды с деформируемой, гигроскопичной и аморфной матрицей или каркасом из биополимеров (например, полисахаридов и белков), содержащих также низкомолекулярные частицы (например, соли и сахара).) и вода [4, 8]. Микроструктурная организация различных фаз и их физическое состояние, а также наличие воды, которая является основным пластификатором, во многом определяют механические свойства и реологическое поведение пищевых продуктов [8, 1]. С другой стороны, определенный процесс устанавливает движущие силы, например, температуру, влажность, давление и/или градиенты механических напряжений, а условия эксплуатации регулируют их интенсивность. Учитывая неравновесный или динамический характер обработки пищевых продуктов, роль воды как пластификатора очень важна, так как вместе с температурой они определяют состояние аморфных материалов через концепцию стеклования [9]. Как правило, при низкой температуре и/или низком содержании воды продукты находятся в твердом ломком состоянии, так называемом стекловидном состоянии. Однако повышение температуры выше диапазона (или уве-

личение содержания воды) вызывает стеклование: продукты меняют свое состояние на резиноподобное (жидкоподобное) и теперь ведут себя как мягкие вязкоупругие материалы [3, 5]. Другим важным переходом является денатурация белков (в случае приготовления мяса денатурация белков, вызванная нагреванием, играет ключевую роль в структурных изменениях) [11]. Таким образом, изменение объема и деформация пищевых продуктов являются результатом сложных и динамических взаимосвязей между составом и структурой пищевых продуктов и движущими силами, определяемыми процессами и условиями эксплуатации. ▽

Создание и преобразование структур или структурирование материалов оказывает существенное влияние на различные свойства пищевых продуктов, т. е. физические, транспортные, органолептические, а также пищевые свойства [7]. Изменение объема и деформация, в дополнение к изменению содержания влаги и температуры во время обработки, могут вызывать изменения пористости и (кажущейся) плотности пищевых продуктов, тем самым изменяя транспортные и механические свойства материалов. В этом смысле анализ профиля текстуры, который можно рассматривать как имитацию процесса жевания или жевания, часто используется для сопоставления механических измерений с субъективными ощущениями (сенсорными атрибутами), что делает характеристики текстуры пищи более предсказуемыми. Например, модуль Юнга, механическое свойство материалов, считается важной мерой или показателем текстуры. Были предприняты некоторые попытки связать условия процесса и транспортные явления с механическими свойствами и, наконец, с текстурой пищевых продуктов, используя это механическое свойство. Кроме того, структурные модификации из-за различных методов и путей обработки, безусловно, влияют на пероральную обработку и общий процесс пищеварения пищевых продуктов [10]. Помимо сенсорных аспектов, структура и, следовательно, текстура пищи могут влиять на процесс обработки полости рта, помогая снизить скорость приема пищи и потребление энергии. С другой стороны, изменение объема и деформация подразумевают изменение геометрии пищи, а также движение твердого скелета и, следовательно, должны учитываться при моделировании транспортных процессов для корректного расчета градиентов, потоков и средних значений зависимых переменных. Это представляет собой дополнительную проблему для моделирования и имитации пищевых процессов, помимо наличия теплофизических свойств и экспериментальной проверки численных прогнозов.

На сегодняшний день очевидна основная сложность моделирования и симуляции изменения объема и деформации пищевых продуктов во время обработки, но в то же время очевидна важность и, следовательно, необходимость решения этой сложной проблемы. На самом деле, разработка следую-

щего поколения моделей пищевого процесса, т. е. цифровых двойников (виртуальная копия реального процесса), безусловно, требует включения ранее описанных аспектов в направлении целостного и комплексного подхода к разработке пищевого продукта/процесса с учетом текущих и будущих вызовов агропродовольственной отрасли. Таким образом, цель статьи состоит в том, чтобы предоставить общий обзор работ, посвященных моделированию изменения объема и деформаций в различных пищевых процессах с точки зрения пищевой инженерии.

Деформация пищевых материалов не является изолированным явлением, а определенно связана с процессами тепло- и/или массопереноса, которые определяют движущие силы деформации во время обработки. Другими словами, в большинстве приложений пищевой промышленности деформация материала не связана с чистой проблемой механики твердого тела, а связана с физическим взаимодействием, т. е., как правило, это мультифизическая задача. Исключением может быть моделирование текстуры или механического теста. Таким образом, в общих чертах моделирование деформирования естественным образом связано с моделированием тепло- и/или массопереноса или соответствующих явлений переноса для данного процесса. Учитывая, что может иметь место более одного явления

или процесса переноса, которые, таким образом, могут быть смоделированы для данного продукта/процесса, классификация подходов к моделированию не является простой, поскольку многие авторы предлагали различные типы предположений, упрощений и решений для нескольких процессов. На основании проведенного анализа литературы мы предлагаем разделить подходы к моделированию на две основные группы в зависимости от сложности и степени детализации. Внутри каждой группы включены различные подходы к моделированию, от эмпирических до физических (рис.1).

1. Эмпирические, феноменологические и простые теоретические модели. В целом, эти модели относительно просты с точки зрения формулировки и реализации, а их выходными данными являются средние или объемные значения. Некоторые модели этой группы могут помочь в предоставлении локальной или подробной информации в сочетании с моделями, основанными на физике, хотя и с использованием упрощений в формулировке и/или реализации.

2. Физические и гибридные модели. В общих чертах это транспортные модели, сформулированные на основе физических или фундаментальных законов, которые могут включать разные и множественные масштабы. Эти модели предоставляют информацию о локальных значениях, а также



Рис. 1. Современные подходы к моделированию

о средних значениях. В некоторых случаях сложность снижается за счет использования некоторых упрощений (гибридных моделей).

Эмпирические, феноменологические и простые теоретические модели

Подход к эмпирическому моделированию направлен на поиск прямой связи между экспериментальными входными и выходными данными без предпосылки описания основных механизмов, объясняющих такую связь. В этом смысле эти модели часто называют моделями черного ящика или моделями, управляемыми данными. Такая прямая связь может быть установлена с использованием различных численных инструментов, например, регрессионных моделей, методологии поверхности отклика, а также более сложных методов, таких как искусственные нейронные сети [2]. В нашем случае входными данными будут некоторые характеристики продукта и условия обработки, а выходными данными будут различные переменные или свойства, связанные с деформацией пищевых продуктов, например, коэффициент изменения объема (усадка/расширение), плотность, пористость и т.д. Подход представляет собой низкую-среднюю сложность с точки зрения математического моделирования, что делает его более легко реализуемым. Это представляет особый интерес для промышленных приложений, особенно для малых и средних предприятий, которые могут не иметь доступа к более сложным инструментам. С другой стороны, основным ограничением этого подхода, вероятно, является отсутствие физического смысла в установленной зависимости и, следовательно, невозможность объяснения происходящих явлений. Кроме того, этот подход обычно требует большого количества данных для подбора/обучения и проверки, охватывающих широкий диапазон условий, чтобы обеспечить надежные инструменты.

Феноменологические модели основаны на гипотезах, полученных из экспериментальных наблюдений об определенном явлении или интересующем поведении, и пытаются описать вовлеченные механизмы, связывая некоторые ключевые переменные и/или параметры. Отличие этого подхода от эмпирического заключается в степени задействованных фундаментальных знаний. Чисто эмпирическое моделирование в основном представляет собой проблему подбора данных, в то время как феноменологические модели можно рассматривать как первый шаг к основанной на физике или фундаментальной модели или как ее упрощенную версию. Например, строго говоря, классические «законы» явлений переноса, такие как закон Фурье и закон Фика, среди прочих, являются феноменологическими отношениями. Феноменологические модели также называют полуэмпирическими или полутеоретическими моделями. Как правило, эмпирический аспект этих взаимосвязей сводится к (эффективному) коэффициенту или свойству, которое

зависит от материала и основных переменных процесса (например, температуры и содержания воды).

Можно вывести простые модели из фундаментальных понятий и принципов, т. е. из теории. Например, при определенных допущениях балансы масс можно использовать для получения простой модели либо для прогнозирования общего изменения объема, либо для расчета локальной скорости деформации. Такие допущения позволяют получить эти так называемые простые теоретические модели, которые также могут помочь уменьшить сложность моделей, основанных на физике.

В целом, общей характеристикой этих трех типов моделей является то, что они не являются моделями, основанными на механике. То есть изменение объема и деформация не предсказываются путем решения уравнения баланса количества движения твердого тела и использования механических свойств материала, а некоторые аспекты этих явлений описываются косвенным или упрощенным способом. Кроме того, степень эмпиризма может быть значительной. Тем не менее, стоит напомнить, что математические модели по своей сути являются инструментами, которые могут иметь разные цели. Другими словами, с прагматической точки зрения эти простые модели все же могут быть полезны для проектирования, управления и оптимизации процессов, помимо упомянутого использования в сочетании с более сложными формулировками, основанными на физике. Однако, модели этой первой группы имеют ограниченную способность описывать основные механизмы, объясняющие поведение продуктов/процессов. Кроме того, модели, основанные на эмпирических данных, ограничены конкретными условиями (продуктами/процессами), на основе которых были оценены эмпирические параметры, т. е. потребуются новые параметры, если необходимо включить новые условия - оценивается в существующей модели. В этом смысле следует избегать экстраполяции или обобщения в отношении как поведения или механизмов, так и численных предсказаний без соответствующей экспериментальной проверки.

Физические и гибридные модели

Физический или механистический подход к моделированию основан на использовании фундаментальных физических концепций и законов для описания физических механизмов, вовлеченных в процесс. Отправной точкой для моделей, основанных на физике, является постановка задачи, т. е. установление набора гипотез относительно (предполагаемой) лежащей в основе физики процесса и развитие их математического представления через соответствующие физические законы. Математическая формулировка включает основные уравнения, обычно дифференциальные уравнения в частных производных, с соответствующими граничными и начальными условиями. Управляющие уравнения включают балансы или законы сохранения массы,

энергии и количества движения, а также соответствующие определяющие уравнения или законы или выражения явлений переноса, согласно установленным гипотезам, например, закон молекулярной диффузии Фика, закон Фурье, закон теплопроводности, закон упругости Гука и т. д. Как уже упоминалось выше, эти «законы» явлений переноса феноменологичны, но они широко используются и считаются общеприменимыми. Тем не менее, особое внимание необходимо уделять моделированию пищевых процессов: сложная структура и состав пищевых продуктов могут привести к значительным отклонениям от идеального поведения простых или идеальных сред/материалов. Наконец, модель дополняется теплофизическими свойствами, коэффициентами переноса и другими параметрами. В большинстве случаев свойства материалов не являются постоянными величинами, а зависят от переменных состояния, например, содержания воды, температуры, а также пористости в деформируемых пористых материалах. Принимая во внимание суть этого обзора, цель модели, основанной на физике, состоит в том, чтобы описать и предсказать поведение деформации и связанные с ней переменные, такие как скорость твердого тела и пространственно-временная эволюция пористости. Однако, как уже упоминалось, движущие силы деформации обычно создаются процессами переноса тепла и массы, поэтому модели, основанные на физике, должны учитывать все задействованные явления. Это создает связанная система уравнений, для которой численная реализация не является простой (аналитические решения невозможны). К счастью, благодаря прогрессу в вычислительной мощности и наличию специализированного программного обеспечения решение этих моделей в настоящее время осуществимо (хотя и не очевидно). После решения модели необходимо сверить численные результаты с экспериментальными данными, т. е. гипотезы модели должны быть надлежащим образом проверены с использованием данных реального процесса. Впоследствии гипотезы модели могут быть изменены, чтобы лучше описать реальное поведение и, таким образом, получить более точную модель.

В общих чертах подход к моделированию, основанный на физике, имеет некоторые преимущества по сравнению с эмпирическим моделированием:

- Переменные, функции и параметры имеют физический смысл, поэтому результаты можно интерпретировать и объяснять с помощью определенной логики;
- Количество экспериментальных испытаний обычно сокращается, что сокращает затрачиваемое время и ресурсы;
- Отличное понимание процесса обеспечивается благодаря возможности проведения виртуальных экспериментов и полезных исследований, таких как анализ чувствительности и сценарии «что, если»;
- Улучшены возможности проектирования, прогнозирования, контроля и оптимизации продуктов/процессов.

Из-за этих преимуществ физические модели считаются ключевым элементом для разработки цифровых двойников и виртуализации пищевой промышленности или Индустрии 4.0. Недостатки этого подхода в основном связаны с реализацией физических моделей в пищевой промышленности. Основным узким местом, вероятно, является отсутствие данных о теплофизических и механических свойствах для широкого круга продуктов и процессов. В этом важном аспекте требуется дополнительная работа, подкрепленная адекватными экспериментальными методами, а также моделями, основанными на физике, которые можно использовать в качестве инструментов оценки с помощью обратной методологии. Кроме того, разработка и внедрение этих сложных моделей может быть трудной задачей, особенно в промышленной среде, поэтому для расширения их использования в приложениях пищевой промышленности необходимы более конкретные или адаптированные модели и программное обеспечение, а также образование и обучение.

До сих пор предыдущее описание носило довольно общий характер и сфокусировано на основной структуре моделирования, используемой в пищевой инженерии, т. е. на континуумном или макромасштабном подходе. Вкратце, макромасштабный подход основан на континуальной гипотезе и методах усреднения, где репрезентативный элементарный объем используется для описания «точки» бесструктурной континуальной области и для определения локальных макроскопических переменных. Кроме того, метод конечных элементов (МКЭ), вероятно, является наиболее часто используемым численным методом для решения уравнений этих макромасштабных моделей. С другой стороны, за последние 10-15 лет в пищевой инженерии стали применяться новые и многообещающие парадигмы моделирования, основанные на физике: микромасштабные и мультимасштабные подходы. В целом, микромасштабный подход направлен на описание поведения микроструктур, таких как коллоиды, клетки, полимеры, композиты, интерфейсы и молекулярные структуры. Эти сложные микроструктуры на самом деле являются компонентами бесструктурного сплошного материала макромасштабного подхода. Итак, идея состоит в том, чтобы смоделировать физико-химические и механические изменения, происходящие в этих мелких масштабах.

Многомасштабные модели определяются как иерархия взаимосвязанных подмоделей, которые описывают поведение материала в разных пространственных масштабах. Это интересный подход, поскольку биоматериалы на самом деле имеют иерархическую структуру. В этом смысле многомасштабное моделирование может обеспечить решение упомянутого узкого места макромасштабного моделирования в отношении физических свойств. Наиболее важным преимуществом этой парадигмы, вероятно, является явное включение деталей микроструктуры в модель, основанную на физике. Эта особенность, безусловно, увеличивает вышеупомянутые возможности и

возможности механистических моделей. Интересная альтернативная структура для многомасштабного моделирования обеспечивается теорией гибридных смесей, которая основана на механике сплошных сред. С той же целью включения микромасштабной информации в макромасштабные модели применение подходов мягкого вещества также может помочь получить лучшее понимание и полезные сведения о взаимосвязи между структурой и составом, а также свойствами и макроскопическим поведением пищевых продуктов.

Таким образом, существенной характеристикой физических или механистических моделей является то, что изменение объема и деформация материала описываются прямым и явным образом. Этот подход к моделированию основан на механике, т. е. баланс количества движения твердого тела используется для прогнозирования поведения продукта на основе механических свойств материала и движущих сил, создаваемых процессом. Таким образом, эта структура рассматривается здесь как наилучшее возможное решение для достижения глобальной цели развития научных знаний и полезных инструментов для описания и прогнозирования взаимосвязей между условиями обработки и поведением пищевых материалов.

Несмотря на указанные преимущества, формулировка и реализация этих моделей может оказаться сложной задачей. Таким образом, общее решение для уменьшения сложности этих формулировок состоит в том, чтобы избежать решения механической части мультифизической проблемы. То есть деформация твердого тела рассчитывается не через соответствующий баланс количества движения и механические свойства, а получается альтернативным путем, например, с использованием эмпирических, феноменологических и простых теоретических моделей. В таком случае модель каталогизируется здесь как гибридная, так как механическая задача не решается, но по-прежнему рассматриваются уравнения переноса тепла и массы. Другими словами, гибридные модели представляют собой упрощенную версию моделей, основанных на физике. В зависимости от степени упрощения и/или эмпиризма возможности гибридной модели будут ограничены по сравнению с полной или чисто физической моделью.

Наконец, стоит упомянуть важный аспект физических (и гибридных) моделей: геометрическое моделирование пищевых материалов в различных масштабах, т. е. процесс создания цифрового или виртуального представления структуры/геометрии реального продукта. После того, как модель сформулирована, необходимо определить виртуальную область для решения соответствующих уравнений. В случае моделирования реалистичной геометрии доступны различные методы визуализации для выполнения сбора данных. Некоторые исследователи [6] рекомендовали использовать методы, которые обеспечивают трехмерные изображения, которые затем могут быть преобразованы в трехмерные твердотельные модели, чтобы получить всю возможную

информацию о геометрии и структуре материалов. В частности, 3D-модели способны описывать полную связность пористых материалов, что невозможно в 2D-моделях. К таким методам визуализации относятся рентгеновская компьютерная томография, оптические методы и магнитно-резонансная томография. В связи с этим исследователи [12] указали, что рентгеновская микрокомпьютерная томография обеспечивает уникальную возможность захвата неповрежденных трехмерных данных внутренней микроструктуры без значительной подготовки образца и неразрушающим способом. Эти авторы пришли к выводу, что геометрические модели будут значительно улучшены за счет использования данных, что приведет к более реалистичному моделированию и более точным решениям уравнений переноса.

Выводы

Для описания и прогнозирования изменения объема и деформаций пищевых материалов в различных процессах применяется широкий спектр подходов к моделированию. В этой работе была предложена классификация таких моделей, основанная на способности прогнозирования и гипотезах каждого подхода: простые модели способны прогнозировать общее изменение объема и связанные свойства либо из эмпирических данных, либо из теоретических упрощений; модели, основанные на физике, могут предсказывать эволюцию локальной деформации и пористости, а также поле напряжений и связанные с ними величины посредством механического моделирования (модели, основанные на механике). В некоторых случаях механического моделирования избегают, используя теоретические предположения или полуэмпирические подходы для упрощенного вычисления скорости твердого тела (гибридные модели). Безусловно, моделирование на основе механики имеет соответствующие преимущества с точки зрения возможности прогнозирования и интерпретации вовлеченных явлений, предоставляя полезные инструменты и идеи для лучшего понимания взаимосвязей между составом и структурой сырья, условиями обработки и свойствами конечных продуктов.

Литература

- [1] Aguilera J. M., Stanley D. W. Microstructural principles of food processing and engineering. – Springer Science & Business Media, 1999.
- [2] Bhagya Raj G. V. S., Dash K. K. Comprehensive study on applications of artificial neural network in food process modeling //Critical reviews in food science and nutrition. – 2022. – Т. 62. – №. 10. – С. 2756-2783.
- [3] Cuq B., Abecassis J., Guilbert S. State diagrams to help describe wheat bread processing // International journal of food science & technology. – 2003. – Т. 38. – №. 7. – С. 759-766.
- [4] Datta A. K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations //Journal of food engineering. – 2007. – Т. 80. – №. 1. – С. 80-95.
- [5] Guessasma S. et al. Mechanical modelling of cereal solid foods //Trends in Food Science & Technology. – 2011. – Т. 22. – №. 4. – С. 142-153.
- [6] Ho Q. T. et al. Multiscale modeling in food engineering //Journal of food Engineering. – 2013. – Т. 114. – №. 3. – С. 279-291.
- [7] Joardder M. U. H., Kumar C., Karim M. A. Food structure: Its formation and relationships with other properties //Critical reviews in food science and nutrition. – 2017. – Т. 57. – №. 6. – С. 1190-1205.
- [8] Renzetti S., Jurgens A. Rheological and thermal behavior of food matrices during processing and storage: Relevance for textural and nutritional quality of food //Current Opinion in Food Science. – 2016. – Т. 9. – С. 117-125.
- [9] Roos Y. H. Glass transition temperature and its relevance in food processing //Annual review of food science and technology. – 2010. – Т. 1. – С. 469-496.
- [10] Swackhamer C., Bornhorst G. M. Fracture properties of foods: Experimental considerations and applications to mastication //Journal of Food Engineering. – 2019. – Т. 263. – С. 213-226.
- [11] Tornberg E. V. A. Effects of heat on meat proteins–Implications on structure and quality of meat products //Meat science. – 2005. – Т. 70. – №. 3. – С. 493-508.
- [12] Wang Z. et al. Visualizing 3D food microstructure using tomographic methods: Advantages and disadvantages //Annual review of food science and technology. – 2018. – Т. 9. – С. 323-343.

References

- [1] Aguilera J. M., Stanley D. W. Microstructural principles of food processing and engineering. – Springer Science & Business Media, 1999.
- [2] Bhagya Raj G. V. S., Dash K. K. Comprehensive study on applications of artificial neural network in food process modeling //Critical reviews in food science and nutrition. – 2022. – Т. 62. – No. 10. – pp. 2756-2783.
- [3] Cuq B., Abecassis J., Guilbert S. State diagrams to help describe wheat bread processing //International journal of food science & technology. – 2003. – Т. 38. – No. 7. – pp. 759-766.
- [4] Datta A. K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations // Journal of food engineering. – 2007. – Т. 80. – No. 1. – pp. 80-95.
- [5] Guessasma S. et al. Mechanical modeling of cereal solid foods // Trends in Food Science & Technology. – 2011. – Т. 22. – No. 4. – pp. 142-153.
- [6] Ho Q. T. et al. Multiscale modeling in food engineering // Journal of food engineering. – 2013. – Т. 114. – No. 3. – pp. 279-291.
- [7] Joardder M. U. H., Kumar C., Karim M. A. Food structure: Its formation and relationships with other properties //Critical reviews in food science and nutrition. – 2017. – Т. 57. – No. 6. – pp. 1190-1205.
- [8] Renzetti S., Jurgens A. Rheological and thermal behavior of food matrices during processing and storage: Relevance for textural and nutritional quality of food // Current Opinion in Food Science. – 2016. – Т. 9. – pp. 117-125.
- [9] Roos Y. H. Glass transition temperature and its relevance in food processing //Annual review of food science and technology. – 2010. – Т. 1. – pp. 469-496.
- [10] Swackhamer C., Bornhorst G. M. Fracture properties of foods: Experimental considerations and applications to mastication // Journal of Food Engineering. – 2019. – Т. 263. – pp. 213-226.
- [11] Tornberg E. V. A. Effects of heat on meat proteins– Implications on structure and quality of meat products //Meat science. – 2005. – Т. 70. – No. 3. – S. 493-508.
- [12] Wang Z et al. Visualizing 3D food microstructure using tomographic methods: Advantages and disadvantages // Annual review of food science and technology. – 2018. – Т. 9. – pp. 323-343.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Ломакина Полина Анатольевна студент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p>	<p>Lomakina Polina Anatolievna student of the department «Food productions» Penza State Technological University</p>
<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>