УДК 637+517.977.5

О.Н. Мусина, П.А. Лисин

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Предложена методология системного моделирования многокомпонентных продуктов питания. Дано теоретическое и практическое обоснование возможности применения системного моделирования при разработке рецептур продуктов. Данный подход может быть использован при моделировании пищевых продуктов нового поколения и представляет собой методологический базис для разработки новых перспективных и эффективных технологических решений в пищевой промышленности.

Системное моделирование, многокомпонентные продукты, система, оптимизация.

Введение

Системное моделирование представляет собой универсальный научный подход, объединяющий множество решаемых проблем, является универсальным методом при разработке и управлении сложными взаимосвязанными системами [1]. Находит свое применение и в различных областях пищевой промышленности. *Системное моделирование* можно определить как стратегию изучения и создания биосистем, частным случаем каковых являются продукты питания, их рецептуры и технологии производства. Важнейшим прикладным аспектом системного моделирования является возможность проектирования рецептур многокомпонентных пищевых продуктов различного назначения.

Цель данной работы – адаптация общенаучных принципов системного моделирования к решению прикладных задач пищевой отрасли путем создания методологии системного моделирования многокомпонентных продуктов питания.

Материалы и методы

Объект исследования – многокомпонентные продукты питания. Разрабатываемая на основе системного подхода методология системного моделирования продуктов питания базируется на принципах системного моделирования (изложенных ниже), в основе которых лежат фундаментальные законы математического моделирования.

Результаты и их обсуждение

Основным принципом системного моделирования является декомпозиция сложной биосистемы на более простые подсистемы. Этот принцип называют **принципом иерархии системы**. В этом случае математическая модель системы строится по блочному принципу: общая модель подразделяется на блоки, которым можно дать сравнительно простые математические описания. Все подсистемы взаимодействуют между собой и составляют общую единую математическую модель.

Центральное место в системном подходе занимает понятие «система». Разные авторы, анализируя это понятие, дают определения системы с различной степенью формализации, подчеркивая разные ее стороны [2, 3]. Мы определим пищевую систему как совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом и образующих некую целостность.

Главным принципом системного моделирования является целостность, единство биосистемы, достигаемое посредством взаимосвязей и взаимодействий ингредиентов биосистемы и проявляющееся в возникновении новых качественных свойств продукта, которыми ингредиенты системы не обладают. Это свойство ***эмерджентности*** (от англ. *emerge* – возникать, появляться). *Эмерджентность* – принцип, который утверждает, что целое (продукт) можно изучать, расчленив его на части (ингредиенты), и затем, определяя их свойства (ингредиентов), определить свойства целого – продукта.

Основные принципы системного моделирования многокомпонентных продуктов питания представлены в виде схемы (рис. 1).

Принцип **целостности** предполагает рассмотрение биосистемы как единого целого. Примером может служить сквашиваемая молочная смесь: как молочное сырье, так и закваска вносят собственный уникальный вклад в свойства сгустка, причем вклад этот проявляется только при совместном действии. Очевидно, что ни молоко, ни закваска по отдельности не будут обладать свойствами кислотного сгустка. Заквашиваемую молочную смесь можно рассматривать как вариант биоценоза, а ингредиенты смеси – как подсистемы.

Принцип **структурности** позволяет разделить пищевую биосистему на отдельные подсистемы или элементы (см. рис. 2). Иными словами, любая система может быть разобрана «на кирпичики» – структурные блоки. Например, рецептурные ингредиенты творожного продукта (творог, сахар, плодово-ягодный наполнитель, стабилизатор).

Принцип **функциональности** является непременным атрибутом системы. Любая система каким-то образом проявляет себя при взаимодействии с внешней средой, т.е. обладает определенным набором функций, в том числе если рассматривать пищевую биосистему как «черный ящик».

Принцип **иерархичности** дает возможность проранжировать элементы биосистемы по их вкладу в свойства целой структуры, оценить их взаимосвязи и выдвигать как синтетические, так и аналитические заключения.

Рис. 1. Основные принципы системного моделирования многокомпонентных продуктов питания

Принцип **множественности описаний** позволяет рассматривать пищевую биосистему на разных уровнях иерархии и выдвигать в соответствии с целями исследователя практически неограниченный ряд моделей, описывающих функционирование системы.

Принцип **минимизированности** системы – функционирование системы ограничивается ресурсом, который находится в минимуме. Здесь под системой понимается человек как живой организм. Как известно, каждый биологический вид адаптирован к специфичной для него совокупности условий существования (экологической нише). Не исключением является и человек со своими пищевыми потребностями, на которые также распространяется действие одного из фундаментальных законов экологии, закона минимума Либиха [4], гласящего, что наиболее значим тот фактор, который более всего отклоняется от оптимального его значения. Иными словами, рост, развитие и функционирование организма напрямую зависят от того незаменимого вещества, недостаток которого ощущается наиболее остро. Например, недостаток хотя бы одной незаменимой аминокислоты приводит к неполному усвоению и других аминокислот.

Закон Либиха может рассматриваться как частный случай одного из основополагающих принципов экологии – закона толерантности (правило Шелфорда), согласно которому существование вида определяется лимитирующими факторами, находящимися ***не только в минимуме, но и в максимуме*** [5]. Согласно правилу Шелфорда, процветание популяции организмов зависит от комплекса факторов, к каждому из которых у организма существует определенный диапазон толерантности. Диапазон толерантности по каждому фактору ограничен его минимальным и максимальным значениями, в пределах которых только и может существовать организм. Так, поступление витаминов с пищей должно находиться в определенном количественном диапазоне не ниже физиологического минимума, но и не выше. Гипервитаминоз не менее опасен, чем гиповитаминоз.

Принцип **соответствия** основан на учете совокупного действия факторов (правило Митчерлиха) – эффективность функционирования биосистемы определяется всей совокупностью действующих факторов [5]. В идеале ***все*** нутриенты должны содержаться в моделируемом многокомпонентном продукте питания в близких к эталонным количествах и соотношениях.

Существует большое количество классификаций систем. Так, системы можно разделить на статические, состояние которых в течение времени не меняется (например, сухая смесь для детского питания), и динамические, состояние которых изменяется (сквашиваемая молочная смесь, созревающий сыр).

Другая классификация делит системы на детерминированные, в которых значение переменных системы в некоторый момент времени позволяет установить состояние системы в любой другой момент, и вероятностные (стохастические), в которых с определенной вероятностью можно предсказать направление изменения переменных. Классификация по характеру взаимоотношения системы и ее среды делит системы на закрытые, которые не ведут обмена со своей средой веществом и энергией; полуоткрытые, обменивающиеся только энергией, и открытые, которые обмениваются и энергией, и веществом [6].

Системное моделирование многокомпонентных продуктов включает учет следующих **аспектов** [7, 8]:

1) *системно-элементного,* состоящего в изучении ингредиентов, составляющих данный продукт, в рецептуру продукта ингредиенты вносят специфические индивидуальные свойства;

2) *системно-структурного*, заключающегося в выяснении внутренних связей и зависимостей между элементами данной системы и позволяющего получить информацию об изменении физико-химических, структурно-механических, органолептических и других свойств моделируемого продукта;

3) *системно-функционального*, предполагающего выявление функций, для выполнения которых созданы и существуют соответствующие системы, роль ингредиентов в изменении функциональности моделируемого продукта;

4) *системно-целевого*, означающего необходимость научного определения целей и подцелей системы, их взаимодействия между собой;

5) *системно-ресурсного*, заключающегося в выявлении ресурсов, позволяющих достичь целей моделирования;

6) *системно-интеграционного*, состоящего в определении совокупности качественных свойств моделируемого продукта, обеспечивающих функциональные свойства пищевого продукта.

В соответствии с современными представлениями понятие «системное моделирование» включает разработку моделей, регламентирующих все этапы создания продуктов заданного качества и представляющих собой с точки зрения математики систему линейных алгебраических балансовых уравнений, отражающих изменения в составе ингредиентов, на которых они разрабатываются. Наличие данной системы позволяет адекватно описывать изменение химического, витаминного, минерального и других составов моделируемых продуктов питания в зависимости от соотношения и норм используемых сырьевых компонентов, что дает возможность заменить эмпирическое создание продуктов анализом и синтезом его математической модели. Поставленная задача решается путем целенаправленного варьирования количественными соотношениями ингредиентов.

Части системы, которые рассматриваются как неделимые, называют *элементами*, а части системы, состоящие более чем из одного элемента, – *подсистемами*. В результате получается **модель состава системы**, которая описывает, из каких подсистем и элементов состоит система (рис. 2) [6].

Для того чтобы составить представление о свойствах изучаемого объекта, часто бывает необходимо выявить определенные связи между элементами. Совокупность связей элементов друг с другом, обеспечивающих целостность системы, называют ее *структурой*. Модель структуры в простейшем виде представляет собой список существенных для решения конкретной задачи отношений.

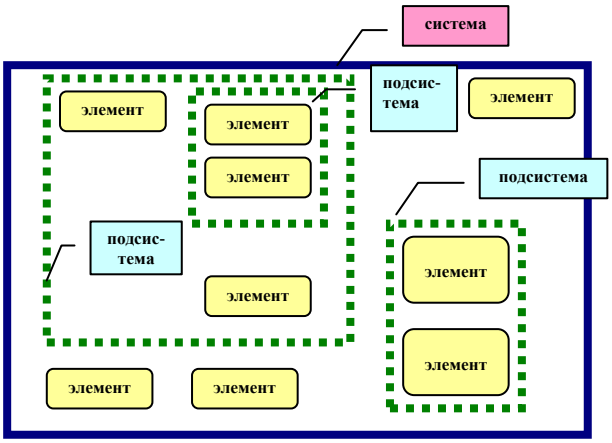

Рис. 2. Модель состава системы

Так, при моделировании рецептуры многокомпонентного пищевого продукта не учитываются потери ингредиентов при движении по массопроводам, хотя объективно такие потери существуют; в то же время потеря пищевой ценности при механической или термической обработке ингредиентов (разница в массе брутто и нетто, деструкция витаминов и т.п.) может быть учтена.

Поскольку все структурные схемы имеют много общего, возможно абстрагирование от их содержательной стороны и построение схем, в которых обозначены только элементы и связи между ними, а также (в случае необходимости) разница между элементами и между связями. Такая схема называется *графом* [6].

На рис. 3 представлен граф сотовой структуры взаимосвязи подструктурных элементов проектируемого многокомпонентного пищевого продукта.

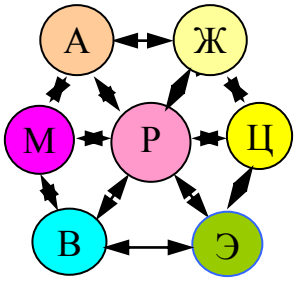

Рис. 3. Граф сотовой структуры системного моделирования многокомпонентных продуктов питания: ***Р*** – рецептура моделируемого продукта; ***А*** – аминокислотный состав продукта; ***Ж*** – жирнокислотный состав продукта; ***Ц*** – себестоимость продукта; ***Э*** – энергетическая ценность продукта; ***В*** – витаминный состав продукта; ***М*** – минеральный состав продукта

Представленный сотовый граф отражает взаимосвязь между пищевой ценностью и экономической составляющей моделируемого продукта.

В самом общем виде системное моделирование многокомпонентного пищевого продукта предполагает этапы действий, представленные в виде алгоритма (рис. 4).

Рис. 4. Этапы системного моделирования многокомпонентного продукта

Использование принципов системного моделирования позволяет провести декомпозицию технологической системы производства продукта на этапе рецептурных расчетов композиционной смеси с помощью линейных моделей, т.е. модели, где математические зависимости (равенства или неравенства) линейны относительно всех переменных величин, включенных в модель. Сущность задач такого вида заключается в том, чтобы из множества возможных рецептурных вариантов выбрать по заданному признаку **оптимальный** вариант. Разработка общих методов их решения начата в 1939 году российским математиком Л.В. Канторовичем, в работах американского ученого Д. Данцига и получила название симплекс-метода. Симплекс-метод стал универсальным методом линейного программирования в решении оптимизационных задач.

Методика расчета указанных характеристик пищевых продуктов основана на линейных уравнениях материального баланса по каждому химическому элементу и на алгоритме расчета массовой доли витаминов, макро- и микроэлементов, аминокислот и энергетической ценности, показателей, характеризующих процент соответствия суточной потребности в рационе питания выбранной группы населения.

Для реализации поставленной задачи следует:

– сформировать информационный **банк данных,** который включает вид ингредиентов, их химический состав, оптовые цены, массовые доли витаминов, макро- и микроэлементов, витаминного состава и показатели стандартного состава разрабатываемого многокомпонентного продукта;

– на основании информационного банка данных составить систему **балансовых линейных алгебраических уравнений** по химическому составу моделируемого продукта (массовой доли жира, белка, влаги, углеводам, витаминам, макро- и микроэлементам, аминокислотам и др.);

– определить технологические **ограничения** на использование отдельных видов ингредиентов (стабилизатора, специй и т.д.) согласно нормативно-технической документации в технологии производства проектируемого продукта;

– установить **функцию цели** (функционал) для проведения оптимизации рецептуры;

– **решить** поставленную рецептурную задачу в компьютерной математической системе;

– **провести анализ** технологической, экономической и пищевой ценности вариантов рецептур разрабатываемого продукта и дать обоснованный выбор рецептуры продукта, наиболее полно отвечающей поставленной цели.

Линейная функция (1) называется *целевой функцией* задачи (*функционалом*). Условия (2) называются функциональными. Вектор $\overline{X} = (x_1, x_2, ..., x_n)$, компоненты которого удовлетворяют функциональным и прямым ограничениям задачи, будем называть планом, или допустимым решением задачи линейного программирования (ЗЛП). Допустимое решение, максимизирующее (минимизирующее) целевую функцию, называется оптимальным планом задачи. В общем виде задача ЛП в стандартной форме записывается в виде:

$$\max(\min) F(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{j=1}^{n} C_j X_j, \qquad (1)$$

$$\begin{cases} \sum Ж_i \cdot X_i = Ж \\ \sum Б_i \cdot X_i = Б \\ \sum У_i \cdot X_i = У \\ \sum Вл_i \cdot X_i = Вл \\ \sum Э_i \cdot X_i = Э \\ \sum Ц_i \cdot X_i = Ц \\ \sum C_i \cdot X_i = C \\ \sum A_i \cdot X_i = A \\ \dots\dots\dots\dots \\ \sum Ca_i \cdot X_i = Ca \\ \sum K_i \cdot X_i = K \\ \dots\dots\dots\dots \\ \sum Вал_i \cdot X_i = Вал \\ \sum Изо_i \cdot X_i = Изо \\ \dots\dots\dots\dots \\ \sum X_i = 100 \end{cases}$$

$$X_i \geq 0, i = 1,2,...,n, \qquad (2)$$

где $Ж_i$, $Б_i$, $У_i$, $Вл_i$ – массовая доля жира, белка, углеводов, воды в ингредиентах; *Ж, Б, У, Вл* – массовая доля жира, белка, углеводов и воды в моделируемом продукте; $Э_i$ – энергетическая ценность *i*-го ингредиента; *Э* – энергетическая ценность моделируемого продукта; $Ц_i$ – стоимость *i*-го ингредиента; *Ц* – стоимость моделируемого продукта; C_i – массовая доля витамина С в *i*-м ингредиенте; *C* – массовая доля витамина *C* в моделируемом продукте; A_i – массовая доля витамина *A* в *i*-м ингредиенте; *A* – массовая доля витамина *A* в моделируемом продукте; Ca_i – массовая доля кальция в *i*-м ингредиенте; *Ca* – массовая доля кальция в моделируемом продукте; K_i – содержание калия в *i*-м ингредиенте; *K* – содержание калия в моделируемом продукте; $Вал_i$ – содержание незаменимой аминокислоты валина в *i*-м ингредиенте; *Вал* – содержание валина в моделируемом продукте; $Изо_i$ – содержание изолейцина в *i*-м ингредиенте; *Изо* – содержание изолейцина в моделируемом продукте.

Для определения направления движения к оптимуму строят вектор-градиент ∇, координаты которого являются частными производными целевой функции и определяются по формуле

$$\nabla = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1}, \frac{\partial F}{\partial x_2}, ... \frac{\partial F}{\partial x_n} \right). \qquad (3)$$

Для получения расчетной информации о массовых долях макро- или микропитательного вещества в продукте применяется формула, описывающая уравнения материального баланса:

$$S = \sum_{i=1}^{n} X_I \cdot S_I / \sum_{i=1}^{n} X_I, \qquad (4)$$

где *S* – массовая доля конкретного макро- или микропитательного вещества в рецептурной смеси в *i*-м компоненте, %; X_I – массовая доля *i*-го компонента в рецептурной смеси, %; S_I – массовая доля конкретного макро- или микропитательного вещества в *i*-м компоненте, %.

Практическая реализация принципов системного моделирования возможна на основании модульного принципа при участии созданных авторами компьютерных программ: «МИНИМУМ-МАКСИМУМ» (внесена Роспатентом в реестр программ для ЭВМ под № 2010612628, 15.04.2010), «ИДЕАЛЬНЫЙ БЕЛОК» (№ 2010616153, 17.09.2010), а также поданного на регистрацию программного модуля OPTIMUS (включает расчет аминокислотного состава, минимального скора, коэффициента утилитарности, коэффициента сопоставимой избыточности и содержания белка в многокомпонентной композиции в подмодуле AMINOSKOR, витаминного состава в подмодуле VITAMAKS и минерального состава в подмодуле MINERALMAKS). Итоговая распечатка результатов системного моделирования многокомпонентного продукта включала: наименование входящих ингредиентов; рецептурный состав моделируемого продукта; энергетическую ценность продукта; витаминный состав; минеральный состав; аминокислотный состав белка компонентов композиции и эталона; содержание в них белка; количественные показатели аминокислотного состава, минимального скора, коэффициента утилитарности, коэффициента сопоставимой избыточности многокомпонентной композиции в зависимости от соотношения ее белоксодержащих ингредиентов.

Практическая реализация системного моделирования была апробирована на примере моделирования рецептур многокомпонентных молочных продуктов [7, 8]. Смоделированный творожный продукт отвечал требованиям, предъявляемым к эталонному продукту для выбранной возрастной группы [9].

Вывод

Созданная авторами методология системного моделирования многокомпонентных продуктов позволяет целенаправленно и оперативно разрабатывать продукты с заданными свойствами. Методика может быть использована в высших учебных заведениях при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов, в научных исследованиях, а также в производственной деятельности инженера-технолога при разработке и совершенствовании рецептур продуктов. Разработанный подход может быть использован при моделировании пищевых продуктов нового поколения и представляет собой методологический базис для нахождения новых перспективных и эффективных технологических решений в пищевой отрасли.

Список литературы

1. Системный подход в современной науке (к 100-летию Людвига фон Берталанфи). – М.: Прогресс-Традиция, 2004. – 560 с.
2. Волкова, В.Н. Теория систем / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. – М.: Высшая школа, 2006. – 511 с.
3. Прангишвили, И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
4. Бродский, А.К. Краткий курс общей экологии / А.К. Бродский. – СПб.: Деан, 2000. – 224 с.
5. Коробкин, В.И. Экология / В.И. Коробкин, Л.В. Передельский. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 602 с.
6. Бондарев, В.П. Концепции современного естествознания: учебник / В.П. Бондарев. – М.: Альфа-М, 2003. – 464 с.
7. Лисин, П.А. Компьютерные технологии в рецептурных расчетах молочных продуктов / П.А. Лисин. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 102 с.
8. Мусина, О.Н. Возможности современной науки в составлении рецептуры многокомпонентных молочных продуктов / О.Н. Мусина, П.А. Лисин // Молочное дело. – 2009. – № 12. – С. 24–26.
9. Липатов, Н.Н. Формализованный анализ амино- и жирокислотной сбалансированности сырья, перспективного для проектирования продуктов детского питания с задаваемой пищевой адекватностью / Н.Н. Липатов, Г.Ю. Сажинов, О.Н. Башкиров // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2001. – № 8. – С. 11–14.

ГНУ «Сибирский научно-исследовательский
институт сыроделия Россельхозакадемии»,
656016, Россия, г. Барнаул, ул. Советской Армии, 66.
Тел.: (3852) 56-46-12
e-mail: sibniis.altai@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Омский государственный
аграрный университет им. П.А. Столыпина»,
644008, Россия, г. Омск, Институтская площадь, 2.
Тел.: (3812) 24-39-76
e-mail: adm@omgau.ru

SUMMARY

O.N. Musina, P.A. Lisin

SYSTEM MODELING OF MULTICOMPONENT FOODS

The methodology of the system modeling for multicomponent foods is proposed. The practical and theoretical substantiation of the system modeling application in the development of foods recipes has been given. This approach can be used in modeling of new generation food products and represents a methodological basis for the development of new effective technological solutions in the food industry.

System modeling, multicomponent foods, system, optimization.

Siberian research Institute for cheese-making
Russian Academy of agricultural Sciences
656016, Russia, Barnaul, Sovetskaya Army, 66
Phone: (3852) 56-46-12
e-mail: sibniis.altai@mail.ru

Omsk state agrarian University by P.A. Stolypin
644008, Russia, Omsk, Institutskaya square, 2
Phone: (3812) 24-39-76
e-mail: adm@omgau.ru