

Технический директор А.В. Токарев,
(«ФудСофт» г. Воронеж)
E-mail: multimeat@mail.ru

профессор О.Н. Красуля
(Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского)
кафедра «Технологии продуктов питания и экспертизы товаров».
E-mail: okrasulya@mail.ru

Technical director A.V. Tokarev,
("FoodSoft", Voronezh)
E-mail: multimeat@mail.ru

professor O.N. Krasulya
(Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovskiy)
Department of "Information Technology".
E-mail: okrasulya@mail.ru

Оптимизация управляющих воздействий в рецептурах колбасных изделий при наличии технологических дефектов

Optimization of control actions in the formulation of sausage products in the presence of technological defects

Реферат. В статье рассматривается задача оптимизации управляющих воздействий в виде пищевых добавок в рецептурах колбасных изделий для устранения дефектов в мясном сырье при управлении производством. Предложена математическая постановка задачи и алгоритм ее решения. Формально задача классифицируется как комбинаторная задача целочисленного линейного программирования, целью которой является обеспечение набора функционально-технологических и вкусо-ароматических свойств конечного продукта при минимальной стоимости единицы массы пищевых добавок. Предложенный алгоритм решения реализует метод пошагового построения решения с отсевом неперспективных вариантов, определяемых на основе рекуррентных соотношений. Рассмотрен пример определения набора оптимальных пищевых добавок для конкретного производственного случая, когда в рецептуре вареной колбасы «Столичная» содержится большое количество жиросодержащего сырья. Для решения проблемы связывания и эмульгирования жирного сырья, как показано в статье, необходимы пищевые добавки, которые в комплексе содержали бы: фосфат (регулятор кислотности, водоудерживающий агент), антиоксидант, эмульгатор, загуститель, гелеобразователь, животный белок (наполнитель), краситель, фиксатор окраски, усилитель вкуса и аромата. Для примера был представлен набор из шести разных пищевых добавок с указанием их функционально-технологических и вкусоароматических свойств, а также стоимости. Необходимо было определить, какие из этих пищевых добавок включить в рецептуру, чтобы с одной стороны они, в конечном счете, содержали заданный набор указанных свойств, а с другой - их суммарная стоимость была минимальна. Решая данную задачу с применением рассмотренного алгоритма, нашли оптимальный набор пищевых добавок, которые полностью покрывают множество. Этот набор содержит все необходимые ингредиенты для решения поставленной задачи, при этом их суммарная стоимость является минимальной, в отличие от других возможных комбинаций. Рассмотренный алгоритм реализован в программной системе «МультиМит Эксперт» в системе поддержки принятия решений.

Summary. The problem of optimization of food additives in compounding of sausages for elimination of defects in meat raw materials at production management is considered in article. The mathematical problem definition and algorithm of its decision is offered. Formally the task is classified as a combinatory problem of integer linear programming which purpose is providing a set functional and technological and the taste of the final product at the minimum cost of unit of mass of food additives. The offered algorithm of the decision realizes a method of step-by-step creation of the decision with elimination of the unpromising options defined on the basis of recurrence relations. An example of determining the optimal set of food additives for the production of a particular case, when the recipe sausage "Stolichnaya" contains large amounts of fat-containing raw materials. To solve the problem of binding and emulsifying oily materials, as shown in the article are necessary supplements which together would contain: phosphate (pH regulator, water-retaining agent), antioxidant, emulsifier, thickener, gelling agent, animal protein (filler), coloring agent retainer color, flavor intensifier. For example, it was presented with a set of six different food additives with their technological and functional properties of flavor and cost. It was necessary to determine which of these to include in the food additives formulated so as to on the one hand they ultimately comprise a predetermined set of specified properties, and on the other - of the total cost was minimal. Solving this problem with the use of the considered algorithm was found the optimal set of food additives, which completely cover the set. This kit contains all the necessary ingredients for the task, and their total cost is minimal, unlike other possible combinations. The algorithm is realized in program system "MultiMeat Expert" in system of support of decision-making.

Ключевые слова: управление, оптимизация, технологическая система, производство колбас, информационная технология, экспертная система, качество продукта, целочисленное линейное программирование.

Keywords: management, optimization, technological system, production of sausages, information technology, expert system, quality of a product, integer linear programming.

При корректировке технологических эффектов в рецептурах колбасных изделий (например, в рецептуре содержится в значительном количестве мясное сырье с пороком автолиза-PSE, RSE или DFD, мясо птицы механической обвалки (ММО), жиросодержащее сырье и т.п.), как правило, известен перечень функционально-технологических свойств, которыми должна обладать эта рецептура. Этот набор свойств формируется за счет управляющих воздействий в виде пищевых добавок с заданными функциональными свойствами [1-4]. В результате возникает задача подбора перечня управляющих воздействий (в виде пищевых добавок), который в сумме содержал бы нужный набор ингредиентов, но при этом суммарная стоимость единицы массы этих добавок была бы минимальна.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим формальную постановку этой задачи. Пусть дано множество пищевых добавок Mpd, каждый элемент которого Mpd(i) задан в виде кортежа:

$$Mpd(i) = \langle Mpd(i,k), Mpd(i,K+1) \rangle$$

$$\text{где } Mpd(i,k) = \begin{cases} 1, \text{ если добавка } Mpd(i) \text{ обладает} \\ \text{k-тым функциональным свой-} \\ \text{ством,} \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

k = 1,..K, где K – количество функциональных свойств,

Mpd(i,K+1) – цена единицы массы добавки i.

Пример такого множества представлен в таблице 1.

Пусть задан также требуемый набор функциональных свойств в виде вектора:

$$FS = \langle FS(l) \rangle, l=1,..L, L \leq K$$

$$FS(l) = \begin{cases} 1, \text{ если требуется наличие функ-} \\ \text{ционального свойства } l, \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

Пусть Ppd – некоторое подмножество Mpd: Ppd ⊆ Mpd. Определим оператор Fp, формирующий вектор FSp:

$$FSp = Fp(Ppd) \tag{1}$$

$$FSp(l) = 0 \quad l=1,..L$$

$$FSp(l) = FS(l) \vee Ppd(i,l) \quad l=1,..L, i=1,..|Ppd|$$

Таким образом, вектор FSp представляет собой весь набор функциональных свойств, соответствующих подмножеству Ppd.

Требуется определить такое подмножество Ppd, при котором:

$$Fp(Ppd) = FS \tag{2}$$

$$\text{и критерий } Q = \sum_{i=1}^{|Ppd|} Ppd(i, K+1) \rightarrow \min \tag{3}$$

Алгоритм решения задачи

Данная задача относится к комбинаторным задачам целочисленного программирования. Рассмотрим процесс пошагового построения решения этой задачи (см. рисунок 1) на плоскости <S,T>, где T=0,..|Mpd|, S(T) – множество точек, каждой из которых соответствует тройка: <Ppd(T), FSp(T), Q(T), nom(T-1)>, описывающая варианты построения решения на шаге T.

Здесь nom(T-1) – номер точки предыдущего шага, из которой получена точка на шаге T.

Процесс начинается с точки <0,0>, Ppd(0) = ∅, FSp(0)=<0,..0>, Q(0)=0. На первом шаге получаем |Mpd| вариантов формирования множества Ppd, каждое из которых состоит из одного объекта множества Mpd: Ppd(1,1), Ppd(1,2),... Ppd(1,|Mpd|). На втором шаге получим C²_{|Mpd|} вариантов, на третьем C³_{|Mpd|} вариантов, на последнем – C^{|Mpd|}_{|Mpd|}. Такое построение представляет собой прямой перебор вариантов решения задачи. Сопоставим каждой точке плоскости <S,T> вершину некоторого графа, а получение одного варианта решения на каждом шаге построения решения представим дугой графа. Полученный граф будем называть графом допустимых состояний (ГДС). Для уменьшения размерности задачи важно на каждом шаге отсеивать недопустимые и не перспективные варианты решений [5, 6].

Рассмотрим процесс получения новой точки S(T+1,n) из точки S(T,j).

Пусть Mpd(n) ∈ Mpd \ Ppd(T,j).

Образуем

$$Ppd(T+1,n) = Ppd(T,j) \cup Mpd(n) \tag{4}$$

$$FSp(T+1,n) = Fp(Ppd(T+1,n)) \tag{5}$$

Если

$$FSp(T+1,n) = FSp(T,j) \vee \exists 1(FSp(T+1,n,l) > FS(l)), \tag{6}$$

то добавление новой добавки либо не увеличило функциональные возможности нового подмножества, а стоимость набора увеличилась, либо новая добавка обеспечивает лишнее функциональное свойство. Такая вершина

будет считаться недопустимой для дальнейшего развития. В противном случае, новая вершина – допустима. Для допустимой вершины

критерий $Q(T+1,n)$, будем вычислять по следующему рекуррентному соотношению:

$$Q(T+1,n) = Q(T,j) + Mpd(n,K+1). \quad (7)$$

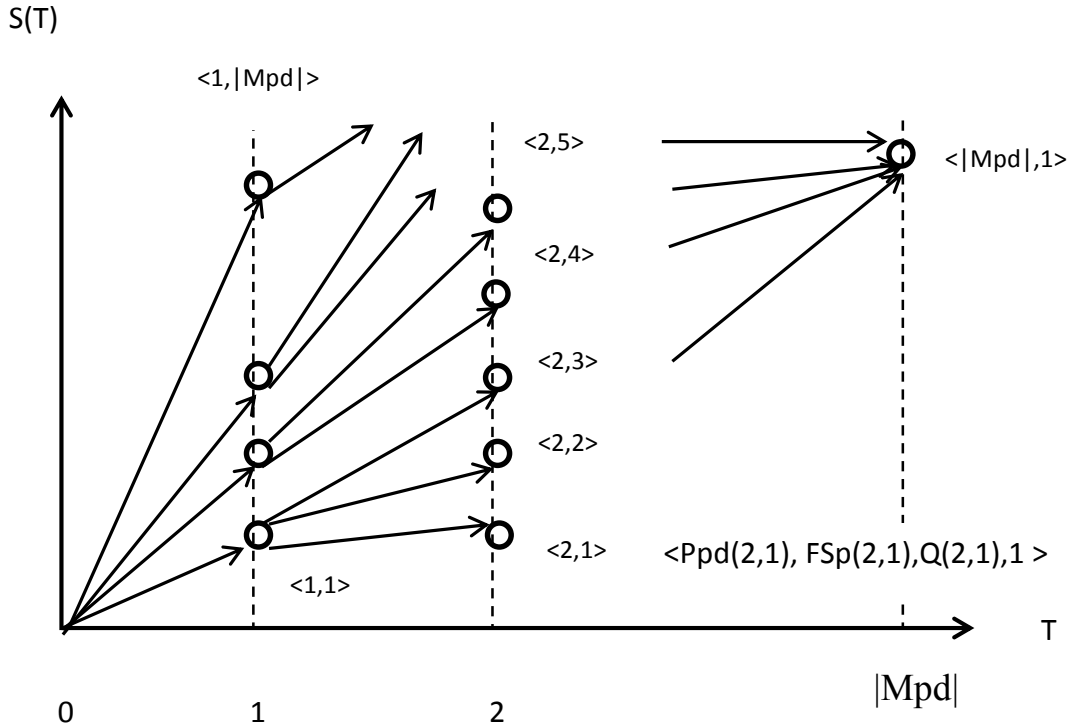


Рисунок 1. Пошаговое построение решения на плоскости состояний

Если

$$FSp(T+1,n) = FS, \quad (8)$$

то такая точка остается на вертикали $T+1$ как допустимая и далее переходит на следующие уровни в таком же статусе.

Сопоставим каждой дуге перехода от точки $\langle T,j \rangle$ к точке $\langle T+1,n \rangle$ величину $Mpd(n,K+1)$, которую будем интерпретировать как длину дуги. В таком случае решение нашей задачи сводится к нахождению кратчайшего пути на ГДС от вершины $\langle 0,0 \rangle$ до вершины $\langle |Mpd|,1 \rangle$.

Рассмотрим возможность уменьшения количества вершин ГДС на каждом шаге построения решения. Пусть $Ppd(T+1)$ – множество всех допустимых точек, полученных на шаге $T+1$. Рассмотрим две произвольные точки на вертикали $T+1$: $Ppd(T+1, i)$ и $Ppd(T+1, j)$, соответствующие им векторы $FSp(T+1, i)$ и $FSp(T+1, j)$, критерии $Q(T+1, i)$ и $Q(T+1, j)$. Точка $Ppd(T+1, i)$ является неперспективной по отношению к точке $Ppd(T+1, j)$ если выполняется следующее соотношение:

$$\forall m(Ppd(T+1, j, m) \geq Ppd(T+1, i, m) \wedge Q(T+1, j) \leq Q(T+1, i)) \quad (9)$$

Смысл формулы (9) заключается в том, что на множестве $Ppd(T+1, i)$ больше функциональных возможностей по сравнению с множеством $Ppd(T+1, j)$ при меньшей суммарной стоимости добавок. Все неперспективные вершины на каждом шаге построения решения отбрасываются. Таким образом, укрупненный алгоритм решения нашей задачи представлен на рисунке 2.

В блоке 4 производится формирование множества допустимых вершин ГДС на вертикали T в соответствии с формулами (4)-(7). В блоке 5 производится отсев неперспективных вершин ГДС в соответствии с формулой (8), а вершина, удовлетворяющая соотношению (8), остается в допустимых. В блоке 6 отсеиваются неперспективные варианты вершин ГДС в соответствии с формулой (9). В блоке 7 проверяется существование на вертикали вершины, для которой вектор FSP совпадает с вектором FS . Если такая вершина есть, то выдается оптимальное решение. В противном случае выдается сообщение об отсутствии решения.

Рассмотрим пример определения набора оптимальных пищевых добавок для случая, когда в рецептуре вареной колбасы «Столичная» содержится большое количество жиросодержащего сырья. Пусть набор состоит из шести пищевых добавок со следующими названиями торговых марок: «Тарипрот супер», «Эмульмикс», «Столичная комби», «Рот-колор», «Росмикс система Жир Е», «Росмикса-рома Столичная», свойства которых указаны в

таблице 1 (0 – свойство в добавке отсутствует, 1 – свойство присутствует). Для решения проблемы связывания и эмульгирования жирного сырья, как ранее было показано, необходимы пищевые добавки, которые в комплексе содержали бы: фосфат (регулятор кислотности, вододерживающий агент), антиоксидант, эмульгатор, загуститель, гелеобразователь, животный белок (наполнитель), краситель, фиксатор окраски, усилитель вкуса и аромата.

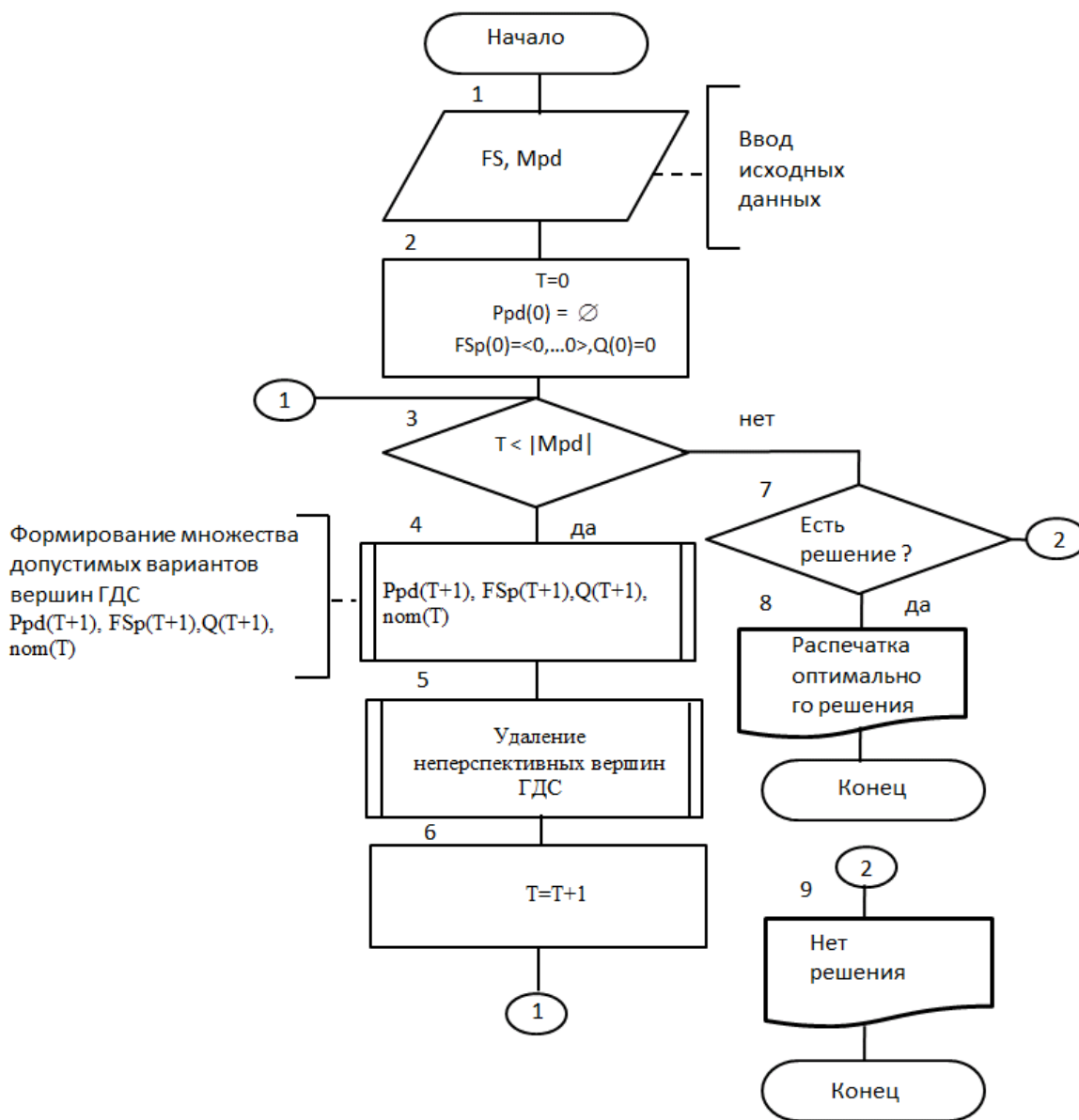


Рисунок 2. Укрупненный алгоритм решения задачи определения оптимального набора управляющих воздействий в виде пищевых добавок

Свойства пищевых добавок и их стоимость

Номер до- бавки	Пище- вые до- бавки	Функционально-технологические и вкусоароматические свойства пищевых добавок									Цена руб./кг
		Во- до- удер- жи- ваю- щие агент	Анти- окси- дант	Эмуль- гатор	Загу- сти- тель	Геле- об- разо- ва- тель	Напол- нитель	Краси- тель	Фикса- тор окраски	Уси- ли- тель вкуса и аро- мата	
1	Тари- прот супер	0	0	0	1	1	0	0	0	0	360
2	Эмуль- микс	0	0	1	0	0	0	0	0	0	200
3	Сто- личная комби	1	1	0	0	0	0	1	1	1	330
4	Рот-ко- лор	0	0	0	0	0	0	1	0	0	265
5	Ро- смикс си- стема Жир Е	1	1	1	1	1	1	1	1	0	306
6	Ро- смик- сарома Сто- личная	0	0	0	0	0	0	0	0	1	330

Необходимо определить, какие пищевые добавки включить в рецептуру, чтобы с одной стороны они, в конечном счете, содержали заданный набор указанных свойств, а с другой – их суммарная стоимость была минимальна. Решая данную задачу с применением рассмотренного выше алгоритма, получим, что оптимальным набором добавок будут: «Росмикс система Жир Е» и «Росмиксарома Столичная» – они полностью покрывают множество. Этот набор содержит все необходимые ингредиенты для решения поставленной задачи, при этом суммарная стоимость будет минимальная (636 руб/кг), в отличие от других возможных комбинаций.

Результаты и обсуждение

Рассмотренная постановка задачи и алгоритм ее решения позволил включить эту

задачу в программный комплекс «"МультиМит Эксперт"» [7] системы поддержки принятия решений экспертной системы для технолога мясоперерабатывающего предприятия. По своему классу она относится к комбинаторным задачам целочисленного линейного программирования. Предложенный алгоритм решения развивает идеи динамического программирования и позволяет отсеивать неперспективные варианты, используя рекуррентные соотношения на каждом шаге построения решения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность ООО «Сириус» за финансовую поддержку при разработке экспертной системы «МультиМитЭксперт».

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Рогов И.А., Забашта А.Г., Казюлин Г.П. Технология мяса и мясных продуктов (в 2-х книгах). М.: КолосС, 2009. 565 с.
- 2 Красуля О.Н. и др. Моделирование рецептов пищевых продуктов и технологий их производства: теория и практика. Учебное пособие. СПб.: ГИОРД, 2015. 320 с.
- 3 Нечаев А.П. и др. Технология пищевых производств. М.: КолосС, 2007. 768 с.
- 4 Sablani Shyam S., Rahman M. Shafiur, Datta Ashim K., Mujumdar Arun S. Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. 613 p.
- В. И., Корзунов С. А., Грачева С.А. Оптимизация календарного плана выполнения комплекса взаимосвязанных работ в системе поддержки принятия решений // Прикладная информатика. 2014. №4(52). С. 101-108.
- 6 Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирования. М.: Вильямс, 2007. 1152 с.
- 7 Свидетельство № 2013616949 Российская Федерация. Программа для решения технологических и учетных задач на предприятиях мясной и рыбной промышленности «Мультимит Эксперт»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Токарев А.В., Красуля О.Н.; заявитель и правообладатель Токарев А.В. Заявка № 2013615177, 17.06.2013; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 29.07.2013.

REFERENCES

- 1 Rogov I.A., Zabashta A.G., Kazyulin G.P. Tehnologiya myasa i myasnnykh produktov (v 2-h knigah) [Technology of meat and meat products (2 books)]. Moscow, Koloss, 2009. 565 p. (In Russ.).
- 2 Krasulia O.N., Nikolaeva S.V., Tokarev A.V. et al. Modelirovanie retseptur pischevykh produktov i tehnologiy ih proizvodstva: teoriya i praktika [Modeling of food recipes and manufacturing technologies: theory and practice]. Saint-Petersburg, GIOR, 2015. 320 p. (In Russ.).
- 3 Nechaev A.P., Shub I.S., Anoshina O.M. et al. Tekhnologiya pishhevykh proizvodstv [The technology of food production]. Moscow, Koloss, 2007. 768 p. (In Russ.).
- 4 Sablani Shyam S., Rahman M. Shafiur, Datta Ashim K., Mujumdar Arun S. Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007. 613 p.
- 5 Karpov V.I., Korzunov S.A., Gracheva S.A. Optimization of schedule performance of a complex of related works in the decision support system. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2014, no. 4(52), pp. 101-108. (In Russ.).
6. Giarratano J., Riley G. Ekspertnyie sistemy: printsipy razrabotki i programmirovaniya [Expert Systems: Principles and Programming, Fourth Edition: Principles and Programming]. Moscow, Williams, 2007. 1152 p. (In Russ.)
- 7 Tokarev A.V., Krasulya O.N. Programma dlya resheniya tehnologicheskikh i uchetnykh zadach na predpriyatiyah myasnoy i ryibnoy promyshlennosti "MultiMeat Expert" [The program for the solution of technological tasks, and accounting at the enterprises of meat and fish industry "MultiMeat Expert"]. Certificate RF, no. 2013616949, 2013. (In Russ.).