

СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРТНО-МОДЕЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ РЕЦЕПТУР МОРОЗИВА

Бреус Н. М., Грибков С. В., Сєдих О. Л.

ВСТУП

Сучасні підприємства харчової галузі постійно повинні швидко реагувати на потреби споживачів та забезпечувати високоякісною продукцією кінцевого споживача на конкурентоздатному рівні. Продукція харчових підприємств має стратегічне значення в будь-якій країні світу. Готова продукція повинна відповідати усім світовим стандартам до харчових продуктів, адже вона є запорукою здоров'я населення. Певну нішу займають складні багатокомпонентні продукти, які мають складну рецептуру виготовлення. На кінцевий багатокомпонентний харчовий продукт впливають фізико-хімічні показники рецептурних інгредієнтів та їх вміст, численні параметри обробки (механічні, теплові, біохімічні тощо) впродовж усього технологічного циклу виробництва. До таких багатокомпонентних харчових продуктів належить морозиво, а враховуючі, що це продукт який май сезонний попит та обмежений термін зберігання, стає актуальним питанням модифікації та створення нових рецептур морозива без втрати фізико-органолептичних властивостей кінцевого продукту. Моделювання рецептур морозива є дуже складний процес через його хімічний склад та фізичні характеристики.

Задача модифікації рецептур може виникати під час необхідності заміни певних інгредієнтів. Здійснення заміни інгредієнта в затвердженій рецептурі без втрати якісних показників кінцевого продукту неможливо без проведення лабораторних досліджень, що вимагають витрат на матеріали та час на їх проведення¹.

Дослідження процесу моделювання рецептур морозива у більшості випадків розглядається лише як завдання розробки нового продукту з оригінальними споживчими властивостями. Такі питання,

¹ Поліщук Г.Є., Бреус Н.М., Шевченко І.І., Гніцевич В.А., Юдіна Т.І., Ножечкіна-Єрошенко Г.М., Семко Т.В. Виявлення впливу казеїну на показники якості морозива з різним вмістом жиру. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2020. № 11. С. 27.

як правило, вирішуються без використання спеціалізованих інформаційних технологій, на основі математичного моделювання з урахуванням підвищення якості продукту².

Під час моделювання рецептури морозива поняття «якість» розглядають як комплекс спеціальних вимог до взаємопов'язаних органолептичних та фізико-хімічних показників. Основними показниками, що формують органолептичне сприйняття консистенції готового продукту, є: об'ємний вміст повітря (збитість), ступінь дисперсності повітряної фази та опір таненню^{3,4}.

Для вирішення такої проблеми може стати в нагоді експертно-моделююча система, яка забезпечить ефективність процесу моделювання та удосконалення рецептур морозива в лабораторних та виробничих умовах. Але основними задачами під час її розроблення є створення математичного апарату, проектування бази знань та даних, а також реалізація та апробація готової системи.

1. Виникнення передумов проблеми проектування рецептур багатокомпонентних харчових продуктів

Рецептуру морозива на молочній основі контролюють відповідно до вимог нормативних документів в якій чітко визначено більшість рецептурних компонентів. Наприклад, у складі морозива на молочній основі обов'язковими компонентами є: цукор та цукристі речовини; жири; стабілізатори; волога; сухий знежирений молочний залишок. Для формування органолептичних показників конкретного виду продукту в рецептуру морозива виробники додають смакоароматичні речовини, наповнювачі та інші компоненти⁵.

При проектуванні рецептур багатокомпонентних харчових систем, як правило, використовуються підходи, які базуються на

² Устименко І.М., Бреус Н.М., Поліщук Г.С. Наукове обґрунтування складу емульсій, призначених для нормалізації молоковмісних продуктів. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. № 5. С. 187.

³ Goff H.D., Hartel W.R. Ice Cream. 7th ed. New York: Springer Sciece & Business Media, 2013. P. 21.

⁴ Поліщук Г. Є. Формування складних дисперсних систем молочного морозива з натуральними компонентами: дис. ...д-ра техн. наук: 05.18.04. Київ, 2013. С. 34.

⁵ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 57.

методах експериментально-статистичного моделювання і лінійного програмування^{6,7,8}.

Метод експериментально-статистичного моделювання часто використовується при розробці оптимальних рецептур лікувально-профілактичних продуктів високої біологічної цінності. Він ґрунтується на виділенні ключової поживної речовини (нутриєнта) з подальшим моделюванням та оптимізацією її властивості⁹. Критерієм оптимізації є вміст всіх незамінних амінокислот. Обчислювальний експеримент полягає в отриманні поверхні відгуку математичної моделі при варіюванні значень змінних по всьому факторному простору. Локальна область факторного простору визначається з урахуванням хімічного складу сировини. Після реалізації експерименту статистична обробка результатів і розрахунок коефіцієнтів виконуються за допомогою регресійного аналізу, що дозволяє отримати регресійні рівняння, які описують кількість кожної з незамінних амінокислот при варіюванні рецептурного складу продукту. До основних недоліків цього підходу необхідно віднести значну кількість необхідних експериментів, зокрема, складних біохімічних аналізів, крім того до уваги береться ефект неправомірності перенесення лабораторних досліджень на промислове обладнання¹⁰.

При застосуванні симплекс-методу для оптимізації рецептур харчових продуктів оптимізаційна задача вирішується за обраними показниками (хімічні, вітамінні, мінеральний склад, енергетична

⁶ Липатов Н.Н., Рогов И.А. Методология проектирования продуктов питания с требуемым комплексом показателей пищевой ценности. Известия вузов. Пищевая технология. 1987. № 2. С. 9.

⁷ Тертычная Т.Н, Манжесов В.И., Ухина Е.Ю. Оптимизация рецептуры кекса. Кондитерское производство. 2007. № 1. С. 21.

⁸ Моделирование рецептур пищевых продуктов и технологий их производства: теория и практика. / О.Н. Красуля, С.В. Николаева, А.В. Токарев СПб.: ГИОРД, 2015. С. 145.

⁹ Олейникова А.Я., Магомедов Г.О., Плотникова И.В. Технологические расчеты при производстве кондитерских изделий. СПб.: РАПП. 2008. С. 101.

¹⁰ Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення. У 2-х ч. Ч.1: монографія / О.І. Черевко, М.І. Пересічний, С.М. Пересічна та ін.; за ред. О.І. Черевка, М.І. Пересічного. Харків: ХДУХТ, 2017, С. 218.

цінність). У розрахунках беруть участь: цільова функція, граничні умови за деякими змінним і обмеження за змістом нутрієнтів^{11,12,13}.

Недоліком такого способу є неможливість врахувати кілька критеріїв оптимізації, нелінійності, які можуть мати місце при взаємодії шуканих змінних¹⁴. Отримане рішення з використанням такого підходу, як правило, знаходиться на межі області допустимих значень.

Методика проектування рецептур багатокomпонентних продуктів харчування, що включає в себе три етапи, розглядається в роботі¹⁵: моделювання амінокислотного складу білка проєктованого харчового продукту і вибір значень, що максимально задовольняють критерію; оцінка жирнокислотного складу проєктованого продукту; розрахунок енергетичної цінності проєктованих харчових продуктів.

Необхідно відмітити використання об'єктно-орієнтованого підходу для проектування багатокomпонентних харчових продуктів, який представлено у роботі¹⁶. Ідея полягає в тому, що кожна з вершин ієрархічної структури представляє собою об'єкт, який відповідає готовому продукту, напівфабрикату, сировині тощо. Кожен рівень ієрархії відповідає певній стадії виготовлення продукту, який, в свою чергу, може бути представлений своїм набором індивідуальних вершин, розташованих нижче по ієрархії. Перевагою такого методу є наслідування властивостей, методів з додаванням нових розрахункових формул, що враховують розширення сировинного асортименту, особливостей виробництва, техніко-економічні показники процесів, що відбуваються в апаратах технологічної лінії. Але недоліком такого підходу є складність реалізації, відсутність готових рішень.

¹¹ Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення. У 2-х ч. Ч.1: монографія / О.І. Черевко, М.І. Пересічний, С.М. Пересічна та ін.; за ред. О.І. Черевка, М.І. Пересічного. Харків: ХДУХТ, 2017, С. 221.

¹² Тертычная Т.Н, Манжесов В.И., Ухина Е.Ю. Оптимизация рецептуры кекса. Кондитерское производство. 2007. № 1. С. 23.

¹³ Донских Н.В. Разработка автоматизированной информационной системы для расчета и оптимизации рецептур. Известия вузов. Пищевая технология. 2011. № 2-3. С. 122.

¹⁴ Лисин П.А. Компьютерное моделирование поликомпонентных молочных продуктов. Пищевая промышленность. 2006. № 11. С. 60.

¹⁵ Сатина О.В., Юдина С.Б. Информационные технологии проектирования продуктов геронтологического питания. Мясная индустрия. 2010. № 6. С. 57.

¹⁶ Донских Н.В. Разработка автоматизированной информационной системы для расчета и оптимизации рецептур. Известия вузов. Пищевая технология. 2011. № 2-3. С. 123.

Необхідно відмітити циклічний алгоритм М. М. Ліпатова, в якому для знаходження власного критерію використовувалася функція бажаності Харрінгтона. При цьому фактор моделювання перетворюється в безрозмірну величину, яка виступає показником відповідності його значення еталону. Перевага функції бажаності Харрінгтона полягає в її безрозмірності, що дозволяє проводити моделювання з використанням факторів різної розмірності і діапазону значень варійованих змінних¹⁷. Цьому підходу властивий недолік, який полягає в об'єднанні багатьох факторів в один комплексний критерій, що значно зменшує ступінь коректності моделі. Крім того, одержуване рішення нестабільне і досить емпіричне. Аналогічні недоліки притаманні підходу Ю.А. Івашкіна в розробці експертної системи адекватного харчування при проєктуванні харчових продуктів, де пропонується використовувати оптимізацію по кожному обраному критерію з попарним порівнянням та оцінкою якості отриманого продукту з незалежним функціоналом якості та шкалами бажаності¹⁸. Однак, з результатів дослідження не зрозуміла процедура отримання оптимальних значень параметрів, тому що задача з двома критеріями не вирішувалася, як двокритеріальна, а побудовані номограми чіткого обґрунтування не мають¹⁹.

Аналітичний огляд вітчизняних та закордонних літературних джерел дає можливість виділити наступні експертні системи: Forecaster, Hazard Analysis and Critical Control Point (НАССР); МультиМит Експерт.

Експертна система Forecaster призначена для прогнозування нових харчових технологій, а в якості об'єкта діагностики виступають документальні інформаційні потоки в області знань «М'ясна промисловість і харчування людини», що отримані з банків даних FSTA, AGRIS/CARIS, AGRESEARARCH, INIS, CABA тощо. Накопичення інформації з інформаційних потоків здійснюється на основі визначених

¹⁷ Koroleva S. V. Practical aspects of using the desirability function in a biomedical experiment. Modern problems of science and education. 2011. № 6. P. 71.

¹⁸ Миронова Н.Г., Ковбаса В.Н. Разработка оптимальных рецептур сухих завтраков с использованием математического моделирования. Хранение и переработка сельхозсырья. 1998. № 1. С. 51.

¹⁹ Hrybkov S. V., Breus N. M., Polischuk G. Ye. Hybrid expert system to model the ice cream recipes. Ukrainian Journal of Food Science. 2017. № 5 (2). P. 295.

термінологічних формул (дескрипторів)²⁰. Структура Forecaster складається з множини функціонально-орієнтованих задач, які об'єднані у наступні групи²¹: ведення бази даних і бази знань; інформаційний аналіз; логічно-статистична обробка потоків.

Система НАССР спрямована на аналіз ризиків, небезпечних чинників і контроль критичних точок. В системі закладено науково – обґрунтована інформація, на основі якої можливо виробництво високоякісної продукції, за рахунок контролю та ідентифікації небезпечних чинників. НАССР впроваджується підприємствами в рамках програми забезпечення належної безпеки харчової продукції²².

Система «МультиМит Експерт» призначена для вирішення широкого спектра технологічних і облікових завдань на підприємствах м'ясної і рибної промисловості^{23,24}. Застосування програмного комплексу «МультиМит Експерт» дозволяє автоматизувати процес виробництва від забою худоби до випуску і реалізації готової продукції, істотно скорочує часові та фінансові витрати підприємства, дає можливість не тільки оптимізувати процес планування і управління, а й знизити собівартість вироблених продуктів, а також витрати на розробку нового асортименту продукції. «МультиМит Експерт» за функціональними можливостями залишається поза конкуренцією на ринку програмного забезпечення для м'ясної та рибної галузі, а також в компаніях, що займаються виробництвом і реалізацією харчових добавок, в науково-дослідних і навчальних закладах²⁵.

²⁰ Моделирование рецептур пищевых продуктов и технологий их производства: теория и практика. / О.Н. Красуля, С.В. Николаева, А.В. Токарев СПб.: ГИОРД, 2015. С. 205.

²¹ Моделирование рецептур пищевых продуктов и технологий их производства: теория и практика. / О.Н. Красуля, С.В. Николаева, А.В. Токарев СПб.: ГИОРД, 2015. С. 210.

²² Портал искусственного интеллекта. Экспертные системы. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/expert-systems/expert-systems.html> (дата звернення: 19.01.2022).

²³ Моделирование рецептур пищевых продуктов и технологий их производства: теория и практика. / О.Н. Красуля, С.В. Николаева, А.В. Токарев СПб.: ГИОРД, 2015. С. 265.

²⁴ Портал искусственного интеллекта. Экспертные системы. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/expert-systems/expert-systems.html> (дата звернення: 19.01.2022).

²⁵ Моделирование рецептур пищевых продуктов и технологий их производства: теория и практика. / О.Н. Красуля, С.В. Николаева, А.В. Токарев СПб.: ГИОРД, 2015. С. 290.

Усі існуючі спеціалізовані системи, що включають функцію проєктування рецептур продуктів харчування, поділяються на два класи: програми у складі автоматизованих систем управління виробництвом і системи, призначені для виконання розрахунків, призначених для певних видів харчових продуктів. Для спеціалізованих пакетів програм, що працюють у складі автоматизованих систем управління виробництвом харчових продуктів, властива висока вартість, їх впровадження потребує підвищення вимог до рівня комп'ютерної підготовки персоналу підприємств харчової промисловості²⁶.

З огляду на вищевикладене, виникає необхідність створення експертно-моделюючої системи для моделювання і оптимізації рецептур морозива, як багатокомпонентного продукту заданої якості в умовах нестабільності характеристик сировини та інгредієнтів з використанням сучасних інформаційних технологій.

2. Математичний апарат моделювання рецептур морозива із заданими показниками якості

Авторами на основі аналізу досягнень вітчизняних та зарубіжних авторів, а також на основі власних досліджень, було зроблено вибір теоретико-множинної математичної моделі для процесу моделювання рецептури морозива²⁷.

На етапі оперативного планування рецептури морозива теоретико-множинна математична модель управління якістю готового продукту має логічно-послідовний вигляд²⁸.

Сировина, яка знаходиться на заданий момент T на складі, позначається $X(T)$ та описується множиною кортежів $X(T, i)$ (1).

$$X(T, i) = \langle X(T, i, 1), X(T, i, 2), \dots, X(T, i, K + 1) \rangle \quad (1)$$

де $X(T, i, 1)$ – кількість i -ї сировини, що знаходиться на складі підприємства, в момент T ;

²⁶ Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. С. 29.

²⁷ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 58.

²⁸ Токарев А.В., Красуля О.Н. Оптимизация управляющих воздействий в рецептурах колбасных изделий при наличии технологических дефектов. Вестник ВГУИТ. 2015. № 4. С. 67.

$X(T, i, 2), \dots, X(T, i, K)$ – показники якості кожної i -ї сировини, що знаходиться на складі в момент T ;

K – загальна кількість показників якості сировини, що знаходиться на складі в момент T .

А також необхідно, щоб виконувались умови (2).

$$X(0)=\emptyset, X(0)=\bigcup_{i=1}^N X(T, i), X(T)>0. \quad (2)$$

Допоміжні матеріали, які знаходяться на заданий проміжок часу T на складі, позначаються $Xdpm(T)$ та описується множиною кортежів $Xdpm(T, i)$ (3).

$$Xdpm(T, i) = \langle Xdpm(T, i, 1), Xdpm(T, i, 2), \dots, Xdpm(T, i, Kv + 1) \rangle, \quad (3)$$

де $Xdpm(T, i, 1)$ – кількість i -го виду допоміжних матеріалів, що знаходяться на складі в момент T ;

$Xdpm(T, i, 2), \dots, Xdpm(T, i, Kv + 1)$ – показники кожного i -го виду допоміжних матеріалів, що знаходяться на складі в момент T ;

Kv – загальна кількість показників якості i -го виду допоміжних матеріалів, що знаходяться на складі в момент T .

При цьому повинні виконуватися рівності (4).

$$Xdpm(0) = \emptyset, Xdpm(T) = \bigcup_{i=1}^N Xdpm(T, i), \quad Xdpm(T) > 0. \quad (4)$$

Запланований обсяг виготовлення морозива на момент часу T описане виразом (5).

$$Pz(T) = \langle Pz(T, 1), Pzmax(T, 2), Pzmax(T, L), Pzmin(T, 2), Pzmin(T, Np) \rangle, \quad (5)$$

де $Pz(T, 1)$ – обсяг морозива, що заплановано виготовити;

$Pzmax(T, 2), Pzmax(T, L)$ – множина максимально допустимих показників якості морозива;

$Pzmin(T, 2), Pzmin(T, 2)$ – множина мінімально допустимих показників якості морозива;

Np – загальна кількість показників якості продукту.

Задача зводиться до синтезу оператором U для інтервалу dT формування кортежу $R(T + dT)$, який описується виразом (6).

$$R(T + dT) = U(X(T), Pz(T), NRec(T)), \quad (6)$$

де $R(T + dT) = \langle Xp(T + dT), Xpdpm(T + dT), Fp(T + dT) \rangle$;
 $Xp(T + dT)$ – множина сировини, яка необхідна для виготовлення запланованого обсягу продукції за проміжок часу $\langle T, T + dT \rangle$;
 $Xpdpm(T + dT)$ – множина допоміжних матеріалів, яка необхідна для виготовлення запланованого обсягу продукції за проміжок часу $\langle T, T + dT \rangle$;

$Fp(T + dT)$ – кортеж продукції, що заплановано виготовити за проміжок часу $\langle T, T + dT \rangle$, $Fp(T + dT) = \langle Fp(T + dT, 1), Fp(T + dT, 2), \dots, Fp(T + dT, Np) \rangle$;

$Fp(T + dT, 1)$ – обсяг продукції, що заплановано виготовити за проміжок часу $\langle T, T + dT \rangle$;

$Fp(T + dT, 2), \dots, Fp(T + dT, Np)$ – набір показників якості продукції, що заплановано виготовити за проміжок часу $\langle T, T + dT \rangle$;

$NRec(T)$ – нова рецептура, розроблена на момент часу T .

$Ff(T + dT)$ – це кортеж фактично виготовленої продукції в часовому проміжку $\langle T, T + dT \rangle$.

Тоді $Ff(T + dT) = \langle Ff(T + dT, 1), Ff(T + dT, 2), \dots, Ff(T + dT, Np) \rangle$, де $Ff(T + dT, 1)$ – обсяг продукції, що виготовлена за часовий проміжок $\langle T, T + dT \rangle$, а $Ff(T + dT, 2), \dots, Ff(T + dT, Np)$ – набір показників якості цієї продукції.

Допустимий оператор Ud забезпечує отримання продукції заданої якості за рахунок виконання співвідношень (7-8).

$$\forall k (Pzmin(T + dT, k) \leq Fp(T + dT, k) \leq Pzmax(T + dT, k)), k = 2, \dots, Np \quad (7)$$

$$\forall k (Pzmin(T + dT, k) \leq Ff(T + dT, k) \leq Pzmax(T + dT, k)), k = 2, \dots, Np \quad (8)$$

$Xn(T + dT)$ – множина сировини, що надійшла на склад в інтервалі часу $\langle T, T + dT \rangle$, а множина сировини в момент $T + dT$ визначиться співвідношенням (9).

$$X(T + dT) = X(T) \cup Xn(T + dT) \setminus Xp(T + dT). \quad (9)$$

Для допоміжних видів матеріалів співвідношення буде описано виразом (10).

$$Xdpm(T + dT) = Xdpm(T) \cup Xdpmn(T + dT) \setminus Xdpmr(T + dT), \quad (10)$$

де $Xdpm(T + dT)$ – множина допоміжних матеріалів на складі в момент $T + dT$;

$X_{dpm}(T)$ – множина допоміжних матеріалів на складі в момент T ;
 $X_{dpmn}(T + dT)$ – множина допоміжних матеріалів, що надійшли на склад в інтервалі $T, T+dT$;

$X_{dmp}(T + dT)$ – множина допоміжних матеріалів, що плануються до використання в інтервалі $T, T+dT$ ²⁹.

U_0 позначаємо допустимий оператор, а U_d – забезпечує оптимальне значення заданого критерію ефективності Q через значення вартості виготовлення морозива за заданою рецептурою. Оператор U описаний у вигляді виразу (11), адже виробництво морозива є складним багатоетапним процесом³⁰.

$$U = \bigcup_{i=1}^4 U_i, \quad (11)$$

де U_i – оператор, на основі якого формується множину сировини для переробки X_p .

На основі заданого плану формується підмножина $X_p(T)$, яка описана представлена виразом (12).

$$X_p(T) = U_1(X(T), P_z(T)). \quad (12)$$

Оператор U_2 описує набір інгредієнтів, необхідних за рецептурою виготовлення морозива, з використанням підмножини $X_p(T)$ та представляється виразом (13).

$$\begin{aligned} \langle Y(T), X_{dmp}(T) \rangle &= U_2(X_p(T), P_z(T)), \\ Y(T) &= \{y(T, i)\}, \quad i = 1, \dots, |Y(T)|, \\ y(T, i) &= \langle y(T, i, 1), y(T, i, 2), \dots, y(T, i, M) \rangle, \end{aligned} \quad (13)$$

де $y(T, i, 1)$ – кількість i -го інгредієнта;

$y(T, i, 2), \dots, y(T, i, M)$ – сукупність показників якості i -го інгредієнта;

M – загальна кількість показників якості i -го інгредієнта;

$X_{dmp}(T)$ – множина допоміжних матеріалів, яку використовують в інтервалі T .

Оператор U_3 відображає хімічний склад рецептури морозива $Z(T)$ у виразі (14) на основі множині $Y(T)$.

²⁹ Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. С. 84.

³⁰ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 60.

$$Z(T) = U_3(Y(T), P_z(T), R), \quad (14)$$

$$Z(T) = \langle Z(T, 1), Z(T, 2), \dots, Z(T, Nf) \rangle,$$

де $Z(T, 1)$ – кількість морозива за заданим планом;

$Z(T, 2), \dots, Z(T, Nf)$ – множина показників якості готового продукту;

Nf – загальна кількість показників якості.

$Z(T)$ перетворюється в $Ff(T+dT)$, що описана виразом (15) з використанням оператора U_4 та відповідає новому плану по виготовленню продукції.

$$Ff(T + dT) = U_4(Z(T), P_z(T)). \quad (15)$$

$Ff(T+dT)$ формується на основі фактичних обсягів виготовленої продукції.

Основним завданням оптимізації рецептури морозива є визначення сукупності інгредієнтів в рецептурі із застосуванням різних видів сировини, що мають різні фізико-хімічні характеристики та харчову цінність^{31,32,33,34}.

Множину інгредієнтів описуємо у вигляді кортежу Y представленого (16).

$$Y(i) = \langle y(i, k) \rangle, \quad i = 1, N; \quad k = 1, K, \quad (16)$$

Складовими (16) є³⁵:

$y(i, 1)$ – мінімально допустима частка i -го інгредієнта в рецептурі;

$y(i, 2)$ – максимально допустима частка i -го інгредієнта в рецептурі;

³¹ Sapiga V., Polischuk G., Breus N., Osmak T. Enzymatic destruction of protopectin in vegetable raw materials to increase its structuring ability in ice cream. Ukrainian Food Journal. 2021. № 10(2). P. 328.

³² Поліщук Г.С., Бреус Н.М., Вовкодав Н.І., Раманаускас Р. Математическое моделирование активации функционально-технологических свойств яблочного пюре. Maisto chemija ir technologija. Food chemistry and technology. Химия и технология пищи. 2013. № 47. С. 85.

³³ Polischuk G.E., Ivanov S.V., Breus N.M. Features of ice-cream foam structure formation. Food science and technology. 2014. Т. 2, № 27. С. 56.

³⁴ Бреус Н.М., Маноха Л.Ю., Поліщук Г.С. Обґрунтування доцільності створення гібридної експертної системи контролю якості заморожених продуктів десертного призначення. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2015. № 6. С. 111.

³⁵ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 58.

- $y(i, 3)$ – вміст води в i -му інгредієнті, %;
- $y(i, 4)$ – вміст жиру в i -му інгредієнті, %;
- $y(i, 5)$ – вміст цукру та цукристих речовин в i -му інгредієнті, %;
- $y(i, 6)$ – вміст стабілізатора структури в i -му інгредієнті, %;
- $y(i, 7)$ – вміст сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ) в i -му інгредієнті, %;
- $y(i, 8)$ – ціна 1 кг i -го інгредієнта, грн.

Вимогами до показників якості кінцевого продукту є³⁶:

- волога Kv , % – $60 \leq Kv \leq 72$;
- СЗМЗ Ks (), % – $8 \leq Ks \leq 12$;
- жир Kj , % – $0,5 \leq Kj \leq 5$;
- стабілізатор структури Kst , % – $0,4 \leq Kst \leq 1,5$;
- цукор та цукристі речовини Kz , % – $14 \leq Kz \leq 18$.

При зазначених вихідних даних потрібно визначити вектор (17).

$$x = \langle x(i) \rangle, i = 1, N, \tag{17}$$

де $x(i)$ – кількість i -го інгредієнта в рецептурі.

Вектор x може містити допустиме рішення, що задовольняє обмеженням: обмеження за вмістом води (18); обмеження за вмістом жиру (19); обмеження за вмістом цукру (20); обмеження за вмістом стабілізатора (21); обмеження за вмістом СЗМЗ (22); сума часток дорівнює одиниці (23); обмеження на використання інгредієнтів (24).

$$\sum_{i=1}^N x(i) \cdot y(i,3) \leq Kv ; \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^N x(i) \cdot y(i,4) \leq Kj ; \tag{19}$$

$$\sum_{i=1}^N x(i) \cdot y(i,5) \leq Kz ; \tag{20}$$

$$\sum_{i=1}^N x(i) \cdot y(i,6) \leq Kst ; \tag{21}$$

$$\sum_{i=1}^N x(i) \cdot y(i,7) \leq Ks ; \tag{22}$$

³⁶ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 61.

$$\sum_{i=1}^N x(i) = 1; \quad (23)$$

$$\forall i (y(i,1) \leq x(i) \leq y(i,2)) \quad i = 1, N. \quad (24)$$

Загальна функція оптимізації відповідно до поставленого завдання буде описана виразом (25).

$$F(x) = \sum_{i=1}^N x(i) \cdot y(i,8) \rightarrow \min. \quad (25)$$

Вищевикладена модель дозволяє формувати нові види рецептур заміною окремих інгредієнтів іншими, які відповідають усім необхідним вимогам.

Замінник або новий інгредієнт доцільно представити виразом (26).

$$Yz = \langle yz(k) \rangle, \quad k = 1, K, \quad (26)$$

де $yz(1)$ – мінімально допустима частка замінника в рецептурі;

$yz(2)$ – максимально допустима частка замінника в рецептурі;

$yz(3)$ – вміст вологи в заміннику, %;

$yz(4)$ – вміст жиру в заміннику, %;

$yz(5)$ – вміст цукру в заміннику, %;

$yz(6)$ – вміст стабілізатора структури в заміннику, %;

$yz(7)$ – вміст сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ), %;

$yz(8)$ – вартість кг замінника, грн.;

S – множина інгредієнтів³⁷.

Якщо $kz \in S$, тоді для його заміни інгредієнтом yz необхідно здійснити наступні кроки:

- додати yz під номером $N + 1$ до множини інгредієнтів;
- у виразах (18–25) замінити N на $N + 1$;
- вираз (24) для номера kst набуває вигляду (27);

$$\forall (kst, 1) \leq x(kst) + x(N + 1) \leq y(kst, 2) \quad (27)$$

- для інших номерів формула (25) залишається незмінною.

³⁷ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 61.

Рецептура готового продукту залежить від набору функціонально-технологічних і смако-ароматичні властивостей, якими повинен володіти кінцевий продукт за зазначеною рецептурою. Набір функціонально – технологічних і смако-ароматичних властивостей формується та корегується за рахунок внесенням до складу рецептур харчових добавок, які мають необхідні функціонально-технологічні властивості³⁸.

В результаті необхідно обрати сукупність харчових добавок, що забезпечать потрібний набір інгредієнтів, але з сумарною мінімальною вартістю одиниці маси цих добавок.

Позначимо множини харчових добавок Mhd , тоді кожен її елемент $Mhd(i)$ представимо виразом (28).

$$Mhd(i) = \langle Mhd(i, k), Mhd(i, K + 1) \rangle, \quad (28)$$

де $Mhd(i, k)$ приймає значення 1, якщо $Mhd(i)$ має k -у функціональну властивість, а 0 в іншому випадку;

$k = 1, \dots, K$, де K – загальна кількість функціональних властивостей; $Mhd(i, K + 1)$ – вартість i -ої добавки.

Набір функціональних властивостей описується вектором (29).

$$FV = \langle FV(1) \rangle, \quad I = 1, \dots, L, \quad L \leq K, \quad (29)$$

де FV приймає значення 1, якщо потрібна k -а функціональна властивість, а 0 – в іншому випадку.

Нехай Phd – підмножина Mhd : $Phd \subseteq Mhd$. Визначимо оператор Fh , що формує вектор FVh (30).

$$FVh = Fh(Phd) \quad , \quad FVh(1) = 0 \quad 1 = 1, \dots, L, \quad (30)$$

$$FVh(l) = FVh(l) \vee Phd(i, 1) \quad l=1, \dots, L, \quad i = 1, \dots, |Phd|.$$

Вектор FVh складається з набору функціональних властивостей, що відповідають підмножині Phd . Необхідно визначити множини Phd для якої виконуються умова (31).

$$Fh(Phd) = FV, \quad (31)$$

³⁸ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 62.

$$\text{I критерій } Q = \sum_{i=1}^{|Phd|} Phd(i, K + 1) \rightarrow \min. \quad (32)$$

Наведена задача належить до задач пошуку найменшого покриття NP-складної задачі оптимізації цілочислового програмування й удосконалена правилами відкидання неперспективних варіантів^{39,40,41,42}.

На рис. 1 наведено покрокову побудову рішень на площині $\langle S, T \rangle$, де $T = 0, \dots, |Mhd|$. Кожен вузол описує варіант побудови рішення на кроці T , що складається з сукупності $\langle Phd(T), FVh(T), Q(T), \text{nom}(T-1) \rangle$. Є важливою позиція, з якої потрапляємо на крок, що позначено $\text{nom}(T-1)$.

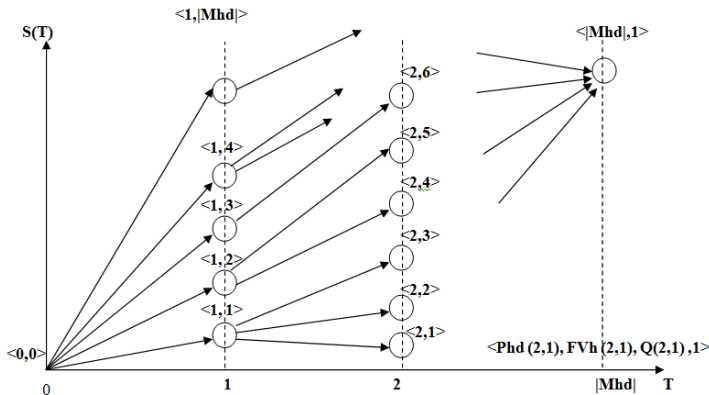


Рис. 1. Графічне представлення розв'язання сформульованої задачі

Процес починається з точки $\langle 0,0 \rangle$, $Phd(0) = \emptyset$, $FVh(0) = \langle 0, \dots, 0 \rangle$, $Q(0) = 0$. На першому

³⁹ Сергиенко И.В., Гуляницкий Л.Ф., Сиренко С.И. Классификация прикладных методов комбинаторной оптимизации. Кибернетика и системный анализ. 2009. № 5. С. 72.

⁴⁰ Blum, C., Puchinger J., Raid, G. R., Roli A. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization a survey. Applied Soft Computing. 2011. №11(6). P. 4137.

⁴¹ Hulianytskyi L.F., Sirenko S.I. Cooperative model-based metaheuristics. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2010. №36, P. 34.

⁴² Raidl G.R. A unified view on hybrid metaheuristics. Lect. Notes Computer Sci., Berlin: Springer-Verlag, 2006. №4030, P. 4.

кроці отримуємо $|Mpd|$ варіантів формування множини Phd , кожний з яких складається з одного об'єкта множини Mhd : $Phd(1,1)$, $Phd(1,2)$, ... $Phd(1,|Mhd|)$. На другому кроці отримаємо $C_{|Mhd|}^2$ варіантів, на третьому $C_{|Mhd|}^3$ варіантів, на останньому $C_{|Mhd|}^{|Mhd|}$. Така побудова являє собою прямий перебір варіантів рішення задачі⁴³.

При розв'язку задачі отримуємо граф допустимих станів, а для прискорення пошуку необхідно на кожному кроці відсікати недопустимі та неперспективні варіанти рішень.

Розглянемо процес отримання нової точки $S(T+1, n)$ із точки $S(T, j)$.

Нехай $Mhd(n) \notin Mhd \setminus Phd(T, j)$, що створює підмножини (33-34).

$$Phd(T+1, n) = Phd(T, j) \cup Mhd(n), \quad (33)$$

$$FVh(T+1, n) = Fh(Phd(T+1, n)). \quad (34)$$

Якщо $FVh(T+1, n) = FVh(T, j) \vee \exists 1 (FVh(T+1, n, 1) > FV(1))$, то додавання нової добавки або не збільшило функціональні можливості нової підмножини, або ж збільшило вартість рецептурного складу, або ж нова добавка забезпечує зайву функціональну властивість. Така вершина буде вважатися недопустимою для подальшого розвитку. В іншому випадку нова вершина – допустима. Для допустимої вершини критерій $Q(T+1, n)$ буде обраховуватися за рекурсивним співвідношенням (35).

$$Q(T+1, n) = Q(T, j) + Mhd(n, K+1). \quad (35)$$

Якщо $FVh(T+1, n) = FV$, то така точка залишається на вертикалі $T+1$ як допустима і далі переходить на наступні рівні в такому ж статусі.

Зіставимо кожній дузі переходу від точки $\langle T, j \rangle$ до точки $\langle T+1, n \rangle$ величину $Mhd(n, K+1)$, яку будемо інтерпретувати як довжину дуги. В такому випадку рішення задачі зводиться до знаходження найкоротшого шляху на графі допустимих станів від вершини $\langle 0, 0 \rangle$ до вершини $\langle |Mhd|, 1 \rangle \langle |Mhd|, 1 \rangle$.

⁴³ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 62.

Для зменшення кількості вершин графа допустимих станів на кожному кроці рішення здійснюємо перевірку двох точок $Phd(T+1, i)$ та $Phd(T+1, j)$, кожна з яких має вектори $FVh(T+1, i)$ і $FVh(T+1, j)$, та критерії $Q(T+1, i)$ і $Q(T+1, j)$. Точка $Phd(T+1, i)$ є неперспективною щодо точки $Phd(T+1, j)$, якщо виконується співвідношення (36), тобто на множині $Phd(T+1, j)$ більше функціональних можливостей у порівнянні з множиною $Phd(T+1, i)$ при меншій сумарній вартості добавок.

$$\forall m(Phd(T+1, j, m)) \geq Phd(T+1, i, m) \wedge Q(T+1, i), \quad (36)$$

де m – точка стану на вертикалі площини $\langle S, T \rangle$.

На кожному кроці побудови рішення відкидаються усі неперспективні вершини⁴⁴.

Покрокова побудова рішення сформульованої задачі:

1) процес починається з точки $\langle 0, 0 \rangle$, $Phd(0) = \emptyset$, $FVh(0) = \langle 0, \dots, 0 \rangle$, $Q(0) = 0$;

2) на першому кроці отримуємо $|Mpd|$ варіантів формування множини Phd , кожен з яких складається з множини Mhd : $Phd(1,1), Phd(1,2), \dots, Phd(1, |Mhd|)$.

3) На другому кроці отримаємо $C_{|Mhd|}^2$ варіантів, на третьому – $C_{|Mhd|}^3$ варіантів, на останньому – $C_{|Mhd|}^{|Mhd|}$.

4) Така побудова являє собою прямий перебір варіантів рішення задачі.

Запропонований математичний апарат дозволяє уникати виникнення недоліків окремих показників якості при розробленні рецептур морозива.

Запропонований математичний апарат можливо використовувати для оптимізації рецептурного складу будь-якого багатокомпонентного харчового продукту. Математичний апарат дозволяє враховувати усі характеристики базових компонентів та харчових добавок.

Для забезпечення розв'язання задачі оптимізації рецептур морозива необхідно розробити та використовувати базу знань та даних, що забезпечить надання інформації про усі можливі інгредієнти, які можуть бути використані у складі рецептури,

⁴⁴ Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. Science and innovation. 2019. Vol. 15 (5). P. 63.

враховувати їх показники якості та функціонально-технологічні властивості.

3. База знань експертно-моделюючої системи

Для формування поля знань експертно-моделюючої системи було обрано наступний алгоритм⁴⁵.

1. Визначення вхідних $\{I\}$ і вихідних $\{O\}$ даних, а саме: визначаємо напрямок руху в поле знань – від $\{I\}$ до $\{O\}$. На зміст та формат поля знань впливає структура даних, як вхідних, так і вихідних.

2. Визначення словника термінів та ключових значущих конструкцій D (назви понять, явищ, процесів, предметів, дій, ознак тощо) за рахунок текстового аналізу всіх протоколів сеансів отримання знань.

3. Створення повного систематизованого набору термінів з технології моделювання рецептур морозива, що представлений об'єктами та поняттями $\{A\}$, які є значущими для прийняття рішень понять та їхніх ознак. Це досягається за рахунок обробки даних словника D .

4. Створення піраміди знань, що базується на поняттях та взаємодії між ними.

5. Створення зв'язків-відношень $\{RA\}$ між поняттями на кожному рівні та між рівнями.

6. Визначення стратегії прийняття рішення $\{Sf\}$, яка надає активність знанням, тобто, виявляються ланцюжки міркувань і зв'язок всіх сформованих раніше понять і відношень, які об'єднано в динамічну систему поля знань.

7. Завершальне структурування поля, яке полягає в упорядкуванні отриманих структур, видалені дублюючих деталей, корегуванні та уточненні конструкції в цілому.

Знання в експертній системі подано у текстовому вигляді. Елементами представлення знань є: тексти, списки, словосполучення тощо.

У базі знань експертно – моделюючої системи реалізовано спосіб подання знань у вигляді конкретних фактів і правил, що дозволяє на їх основі формувати нові.

Усі факти записуються таким чином, щоб визначити, що заданий об'єкт має заданий атрибут (властивості) із заданим значенням у вигляді:

(АТРИБУТ_ОБ'ЄКТ_ЗНАЧЕННЯ).

⁴⁵ Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. 138 С. 118.

Наприклад, трійка (втрати сировини під час складання суміші, її пастеризації та гомогенізації) становить факт «відсоток втрат маси суміші під час термомеханічного оброблення на 1000 кг дорівнює 10 кг». У простіших випадках факт записується простим твердженням, яке може бути істинним або хибним, наприклад: «масова частка сухих речовин суміші менша за 30 %». У таких випадках факт можна позначити коротким ім'ям (наприклад, K_s) або використовувати для представлення факту сам текст відповідної фрази⁴⁶.

Продукційні правила в базі знань мають вигляд:

(ЯКЩО A ТО S),

де A – умова; S – дія.

Дія S виконується, якщо A істинно. Дія S , так само, як і умова, являє собою твердження, що може бути виведено системою (тобто стає їй відомою), якщо істинна умова правила A .

Правила в базі знань слугують для представлення евристичних знань (евристек), тобто неформальних правил міркування, що формуються та експортуються експертом на основі досвіду його діяльності.

Наприклад, якщо факти «масова частка сухих речовин суміші менша 30 %» і «кріоскопічна температура суміші вища за 2,3 °C» вже є в робочій множині, то після застосування засобів наведеного вище правила в нього також включається факт «збитість морозива буде нижчою 60 %».

У випадку, коли система не може вивести чи ідентифікувати певний факт, відбувається перехід в діалоговий режим з користувачем, який повинен підказати вірний результат.

Наприклад: Чи вірно, що масова частка сухих речовин у суміші менша 30 %?

При отриманні позитивної відповіді від користувача сформулюється факт «збитість морозива буде нижчою 60 %».

Розроблена експертно-моделююча система моделювання рецептур морозива є гібридом за способом створення і підтримує концепцію баз даних. Набір таких сутностей з їх атрибутами і зв'язками представлений у вигляді моделі даних на рисунку 2.

⁴⁶ Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. С. 110.

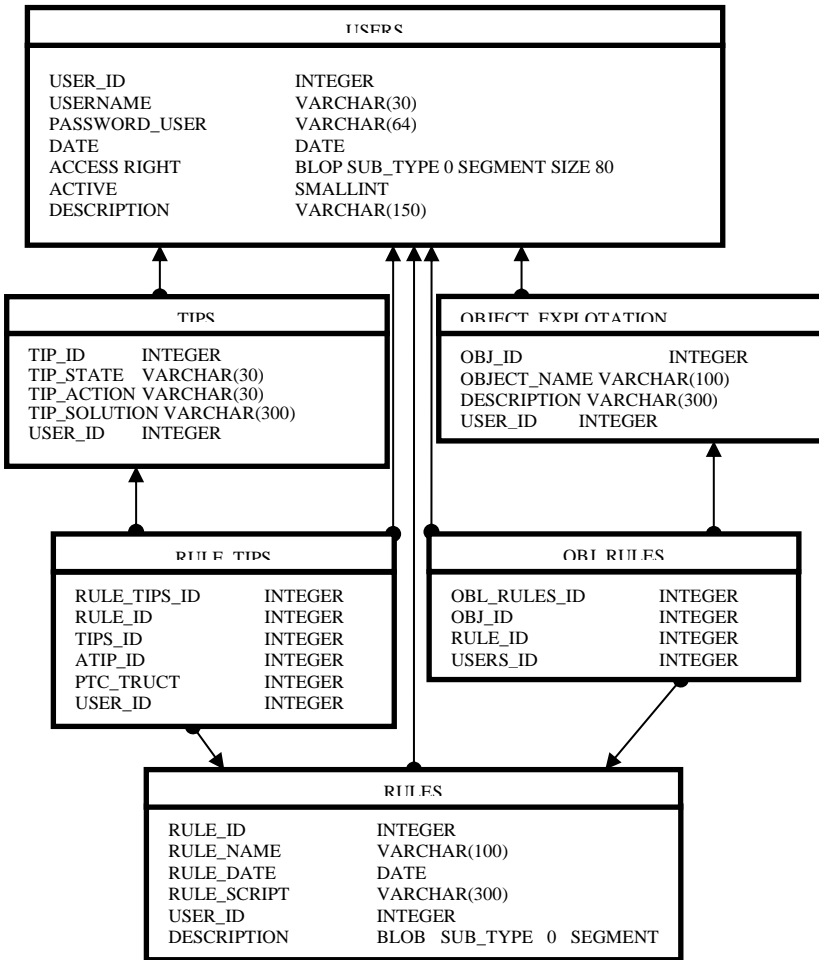


Рис. 2. Модель БЗ експертно-моделюючої системи моделювання рецептур морозива

Зміст кожної сутності бази знань:

1) «Об’єкти дослідження» – перелік об’єктів для виявлення технологічних відхилень у заданій рецептурі.

2) «Правила» – перелік усіх правил, до яких відноситься об’єкт дослідження. Правило – вираз, що описує правило в текстовому форматі з використанням параметрів, в ролі яких можуть виступати об’єкти дослідження. Цей вираз може представляти рекурсію, тобто коли одне

правило вкладено в інше, а те в третє тощо. Між параметрами використовуються логічні операції (AND, OR, NOT). Розбір правила виконується програмно за допомогою спеціального парсеру.

Приклад: припустимо, що об'єктом дослідження є слабка збитість у морозиві молочному при використанні альтернативного стабілізатора «зародки пшениці». За даним об'єктом дослідження прив'язано правило: Якщо ідентифікатор групи продуктів = 1 «Морозиво молочне» і ідентифікатор рецептурних компонентів = 2 «Стабілізатор» і рецептурний компонент = 8 «Зародки пшениці» і розрахункове значення замітника $\leq 20\%$ то об'єкт дослідження = 1 «Слабка збитість»: $((RCP_GROUP_ID=1)) \text{ AND } (RAW_GROUP_ID=2) \text{ AND } (RAW_ID=8) \text{ AND } (RCP_QM_IN_CALC \leq 20)$.

У складі правил описані дії, що можуть включати нові факти. При використанні таких правил усі включені в них факти вносяться до робочої множини фактів.

1) «Правила об'єкта дослідження» – відповідні конкретному об'єкту дослідження правила.

2) «Рекомендації» – набір рекомендацій для усунення описаних проблем.

3) «Рекомендації об'єкта дослідження» – список рекомендацій об'єкта дослідження.

В базі знань необхідно також використовувати дві наступні сутності: рекомендовані норми введення харчових добавок і замітники одного компонента іншим. Обробка даних сутностей виконується окремим алгоритмом.

4) «Рекомендовані норми харчових добавок».

5) «Взаємозамінність компонентів».

Сутності бази знань експертно-модельючої системи з їхніми атрибутами і зв'язками у вигляді кортежів.

Нехай OD – об'єкти дослідження, заданих у вигляді кортежів:

$$OD = E \{od(j)\} j = 1, \dots, n_{OD},$$

де $od(j) = \langle od(j, i) \rangle i = 1, \dots, 3$;

$od(j, 1)$ – код об'єкта дослідження (наприклад, «3»);

$od(j, 2)$ – назва об'єкта дослідження (наприклад, «Визначення Збитості_ММ»);

$od(j, 3)$ – опис (наприклад, «Визначення основної критеріальної характеристики структури морозива молочного – Збитості_ММ»).

P – множина правил, заданих у вигляді кортежів:

$$P = E \{p(j)\} j = 1, \dots, n_P,$$

де $p(j) = \langle p(j, i) \rangle, i = 1, \dots, 5$

$p(j, 1)$ = код правила (наприклад, «5»);

$p(j, 2)$ = найменування правила(наприклад, «правило Збитості_ММ»);

$p(j, 3)$ = дата створення (наприклад, «15.05.2019»);

$p(j, 4)$ = правило (наприклад, « $K_s = 6 \forall K_{st} < 0,5$ », де K_s – вміст СЗМЗ, K_{st} – вміст стабілізатора);

$p(j, 5)$ = опис (наприклад, «правило Збитості_ММ»).

POD – множина правил об'єктів досліджень, заданих у вигляді кортежів:

$POD = E \{pod(j)\} j = 1, \dots, PODN$

де $pod(j) = \langle pod(j, i) \rangle, i = 1, \dots, 3$;

$pod(j, 1)$ = код правила об'єкта(наприклад, «2»);

$pod(j, 2)$ = код об'єкт (наприклад, «3»);

$pod(j, 3)$ = код правила (наприклад, «5»);

R – множина рекомендацій, заданих у вигляді кортежів:

$R = E \{r(j)\} j = 1, \dots, POIN$

де $r(j) = \langle r(j, i) \rangle, i = 1, \dots, 4$;

$r(j, 1)$ = код рекомендації, (наприклад, «6»);

$r(j, 2)$ = вплив на продукт. $r(j, 2) = 1$, якщо вплив на продукт позитивно, $r(j, 2) = 0$ в іншому випадку (наприклад, «0»);

$r(j, 3)$ = рекомендація (наприклад, «Для досягнення нормативної збитості необхідно збільшити кількість СЗМЗ і використовувати «Альтернативні стабілізатори»);

$r(j, 4)$ = опис (наприклад, «Рекомендація для правила Збитість_ММ»).

ROD – множина рекомендацій об'єкту досліджень, заданих у вигляді кортежів:

$ROD = E \{rod(j)\} j = 1, \dots, PODN$

де $rod(j) = \langle rod(j, i) \rangle, i = 1, \dots, 5$;

$rod(j, 1)$ = код рекомендації об'єкта досліджень (наприклад, «9»);

$rod(j, 2)$ = код правила (наприклад, «5»);

$rod(j, 3)$ = код рекомендації, якщо правило істинно (наприклад, «2» («Null», якщо рекомендація не визначена для даного стану правила));

$rod(j, 4)$ = код рекомендації, якщо правило хибне (наприклад, «12» («Null», якщо рекомендація не визначена для даного стану правила));

$rod(j, 5)$ = відсоток довіри до рекомендації (наприклад, «95»).

Механізм логічного виведення реалізує алгоритм прямого висновку з пошуком в глибину і представлений у вигляді підсистеми.

Підсистема логічного введення/виведення забезпечує отримання нових фактів на основі вхідних даних з баз даних та знань, описана наступним кортежем⁴⁷.

$\langle Vb, Spf, Kop, Wp \rangle$,

Vb – функція вибору правил і фактів із бази знань і робочої пам'яті; *Spf* – функція визначення множини фактів, до яких застосовні правила для обчислення значень; *Kop* – функція, що визначає порядок використання правил, якщо в складі правила є однакові імена фактів з різними (конфліктними) значеннями; *Wp* – функція, що здійснює виконання дій відповідно до значення факту.

4. Реалізація та апробація експертно-моделюючої системи

Архітектура експертно-моделюючої системи складається з окремих чотирьох структурних блоків: інтерфейс користувача; програмні модулі (математичний та алгоритмічний апарат, функції контролю якості та відповідності рецептури); бази даних та знань^{48,49,50,51}.

База даних забезпечує зберігання та надання первинної інформації про рецептурні інгредієнти, допоміжні матеріали, показники якості. Вона зберігає дані про рецептурний склад, фізико-хімічні характеристики інгредієнтів та їх властивості, статус рецептури.

База знань призначена для зберігання довгострокових фактів, які описують технології та виробництво морозива, правил, що описують відносини відношення між цими фактами, та інших типів декларативних знань. Структура бази знань описано у розділі 3.

Модулі математичного апарату використовуються для реалізації алгоритмів моделювання рецептур морозива, описаних у розділі 2. Математично-алгоритмічний апарат забезпечує оптимальне обрання

⁴⁷ Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. С. 119.

⁴⁸ Expert Systems: The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century / T. L. Cornelius et al. Academic Press. 2009. P. 150.

⁴⁹ Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирования. М.: Вильямс, 2007. С. 258.

⁵⁰ Wong B. K., Monaco J. A. Expert system applications in business: a review and analysis of the literature. Information and Management. 2013. № 3. P. 142.

⁵¹ Бреус Н.М., Манюха Л.Ю., Поліщук Г.Є. Обґрунтування доцільності створення гібридної експертної системи контролю якості заморожених продуктів десертного призначення. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2015. № 6. С. 110.

взаємозамінних компонентів, що забезпечує ефективне виготовлення продукту.

Алгоритм використання експертно-моделюючої системи розрахунку рецептур морозива має наступні кроки⁵².

1. Запит на розрахунок рецептури.

2. Із архіву нормативних рецептур морозива, кожна з яких відповідає конкретному нормативному документу (ДСТУ, ТУ), обирається рецептура для оптимізації. Якщо висувається задача моделювання нового морозива, то створюється базова рецептура з «нуля». При цьому розраховуються фізико-хімічні властивості морозива та основні економічні показники.

3. Формуються вимоги до рецептури:

- вказується дозволений «коридор» зміни фізико-хімічних характеристик морозива (мінімальне і максимальне відхилення за вмістом цукру, жиру, вміст сухого знежиреного молочного залишку (СЗМЗ), вологи, зокрема й вільної тощо);

- обираються інгредієнти, які можна замінити, призначаються для них замітники і визначається рівень їх замін;

- призначаються вимоги (мінімальна і максимальна величина) на рецептурний склад груп, підгруп або конкретні інгредієнти і замітники;

- задається обмеження на вартість морозива.

Вимоги формуються користувачем (технологом) вручну або використовуються рекомендації експертної системи.

4. Розраховується оптимальна рецептура за таким принципом: мінімізація собівартості морозива за умови збереження його споживчих характеристик і задоволення заданих вимог до рецептури;

5. За допомогою експертно-моделюючої системи проводиться первинний аналіз рецептури на економічну і технологічну придатність (фізико-хімічні показники, відсоток введення інгредієнтів, сировинна структура рецептури, показники якості, економічні показники тощо). Якщо будь-який з параметрів не задовольняє вимогам, то згідно рекомендаціям ЕС, здійснюється корегування вимог (перехід до пункту 3) і перерахунок рецептури.

6. Якщо розрахована рецептура задовольняє вимогам технолога, то він зберігає її в базу даних в архів «оперативні рецептури» і передає на подальший лабораторний аналіз.

⁵² Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. С. 95.

7. Лабораторний аналіз. Рецептуру перевіряють на технологічну придатність, а також уточнюють властивості морозива: органолептичні, функціональні (харчова і біологічна цінність, консистенція) показники, хімічний склад, а також терміни зберігання і збереження споживчих властивостей в часі. Якщо морозиво не задовольняє вимогам, визначають причини, що викликали технологічні дефекти, і на їх підставі проводять корекцію рецептури (перехід до пункту 3).

8. Якщо рецептура пройшла лабораторний аналіз, технолог затверджує її, тим самим переводячи її в архів бази даних «затверджені рецептури». Таку рецептуру може бути запущено у виробництво для виготовлення продукту згідно з виробничим завданням (блок 6 структурно-функціональної моделі).

Пункти 3–8 повторюють стільки раз, скільки потрібно отримати альтернативних рецептур для розроблюваного виду морозива. Надалі, після впровадження у виробництво, згідно інформації з бази даних про поточні залишки і ціни на сировину, а також про собівартості продукції, серед альтернативних рецептур морозива виконується пошук оптимальної з метою отримання максимальної вигоди.

Якщо в рецептурі виявляється технологічний дефект (наприклад, низький вміст дисперсної фази, що призводить до нестійкої структури та робить смак і запах продукту «пустими»), його можливо скорегувати, якщо відомо набір функціонально технологічних і смако-ароматичних властивостей рецептури. Закладені ці знання в базі знань для того, щоб експертна система мала можливість не тільки підказувати якими властивостями необхідно наділити рецептуру для вирішення тієї чи іншої проблеми, а й запропонувати оптимальний набір харчових добавок чи замінників, які в сумі володіють усіма необхідними властивостями. За оптимальність в експертно-моделюючої системі закладено мінімізація загальної вартості.

Експертно-моделююча система складається з базового і 2 додаткових модулів: «Оптимізація та моделювання рецептур», «Аналізу якості рецептур». Зазначені програмні модулі можуть працювати як разом, так і незалежно один від одного, що дозволяє адаптувати інтерфейс і функціонал програмного комплексу під конкретне молочне підприємство.

Призначення програмного модуля «Базовий»: здійснює ведення реєстру нормативних, оперативних (робочих), затверджених рецептур морозива; виконує автоматизований розрахунок базових характеристик рецептури продукту (показники якості: вміст СЗМЗ,

жиру, цукру, вологи, енергетичної цінності та ін., вихід готового продукту, розрахунок кількості води на гідратацію інгредієнтів рецептури), вирішує технологічні питання виробництва, пов'язані з якістю і вартістю продукту; виконує повний облік складських операцій; здійснює розрахунок економічних показників виробленої продукції⁵³.

Основні функції базового модуля:

– ведення реєстру нормативних (базових) рецептур морозива: для кожної рецептури вказуються набір інгредієнтів, нормативні показники, вихід продукту, нормативний документ, допоміжні матеріали;

– створення оперативних (робочих) рецептур на базі нормативних і їх корекція;

– створення затверджених рецептур на базі нормативних і оперативних;

– аналітика рецептур за різними критеріями;

– розрахунок виходу готової продукції;

– контроль в готовому продукті показників якості згідно з нормативними вимогами;

– розрахунок вартісних показників (собівартість);

– формування звітів та друк;

– інтерактивний обмін рецептурами через XML файли;

– рецептурний фільтр – пошук рецептур в реєстрі згідно з заданим критерієм (вимога до інгредієнтного складу, приналежність до рецептурної групи та нормативного документу, з урахуванням цін та ін.);

– розподілення прав доступу – формування користувачів і управління їх правами доступу до окремих модулів і функцій програми.

Призначення програмного модуля «Оптимізація та моделювання рецептур» – моделювання та оптимізація рецептур морозива на підприємствах молочної промисловості.

До основних його функцій відносять:

– оптимізація рецептур морозива з урахуванням фізико-хімічних і функціонально-технологічних властивостей інгредієнтів з метою отримання продукту заданої якості за мінімальною собівартістю;

– моделювання нових продуктів із заданими споживчими характеристиками і мінімальною собівартістю;

53 Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. С. 125.

- визначення оптимальних «замінників» для інгредієнтів рецептури з урахуванням поточної вартості сировини;
- відповідність продукції за органолептичними показниками (зовнішній вигляд, колір, смак);
- формування друкованих форм і звітів, які дозволяють переглядати інгредієнтний склад і властивості рецептури, вартість та якість продукту.

Призначення програмного модуля «Аналізу якості рецептур»: аналізує якість рецептури морозива, виявляє технологічні проблеми і пропонує технологу шляхи їх вирішення. При аналізі рецептур враховується множина різних чинників, зокрема фізико-хімічні та функціонально-технологічні властивості інгредієнтів.

Одержані результати досліджень покладено в основу типових рецептур нових видів натурального молочного морозива з природними структурними компонентами.

На основі типових рецептур розроблено численні любительські види морозива з різними комбінаціями натуральних компонентів і смако-ароматичними добавками. На рисунку 3 та 4 представлено експериментальне підтвердження ефективності використання експертно-моделюючої системи на прикладі рецептури «Морозиво молочне із зародками пшениці».

При моделюванні нової рецептури морозива врахована наступна нормативна документація: ТТІ 31748658-1-2007; ДСТУ 4733:2007, 4734:2007, 4735:2007.

З використанням експертно-моделюючої системи була розрахована нова нормативна оптимальна рецептура морозива молочного з зародками пшениці з урахуванням заміни відповідного стабілізатору на натуральний компонент. Нова рецептура відповідає усім вимогам до якості готового продукту та її вартість зменшилася на 8,64%.

Апробацію створеної експертно-моделюючої системи моделювання рецептур морозива було проведено у виробничих умовах ТОВ «Альфа» і підтвердило її ефективність.

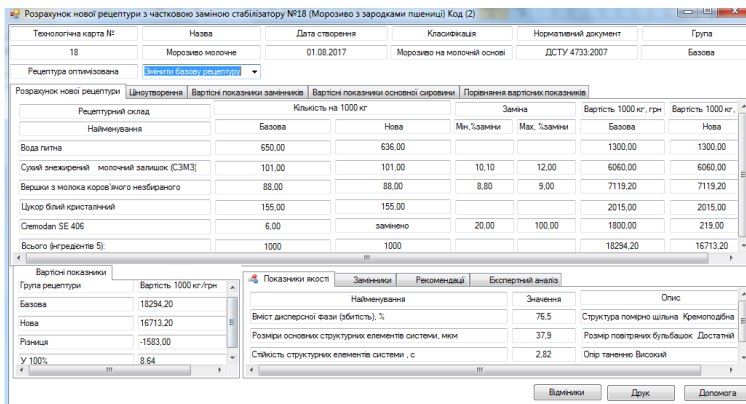


Рис. 3. Вікно системи з розрахунком нової рецептури морозива з частковою заміною стабілізатору

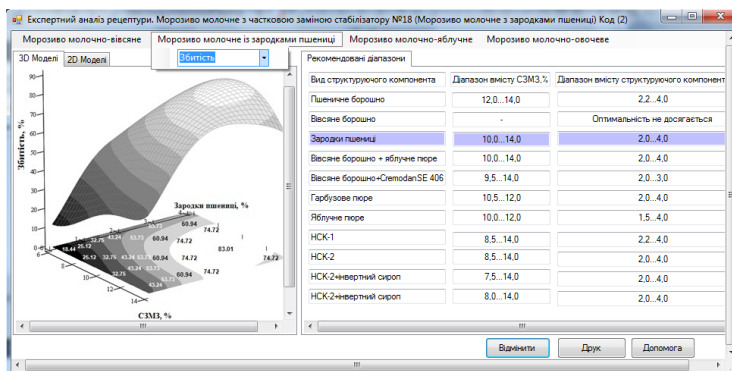


Рис. 4. Вікно системи з результатами експертного аналізу рецептури

ВИСНОВКИ

За результатами власного дослідження була створена експертно-моделююча система для створення та корегування рецептур з урахуванням усіх заданих властивостей. Використання створеної бази знань забезпечило можливість враховувати численні технологічні властивості при моделюванні оптимальної рецептури, чого неможливо досягти тільки за допомогою одного математичного апарату. Запропонована експертно-моделююча система дозволяє цілеспрямовано управляти якістю готового продукту під час усіх

технологічних етапів виробництва. Найбільша значимість розробки полягає у автоматизованому підборі для заміни рецептурних компонентів альтернативними без втрати якості та смакових властивостей.

Економічний ефект від впровадження експертної системи, отриманий при використанні результатів науково-дослідних робіт закладений в базу знань системи, забезпечить економію робочого часу, мінімізацію витрат на компоненти рецептур. Створена система забезпечить оперативну, обґрунтовану інформацію для прийняття технологічних рішень щодо рецептур виготовлення усіх видів морозива.

АНОТАЦІЯ

Запропонована експертно-моделююча система дозволяє у виробничих умовах харчового підприємства провести моделювання та корегування рецептури морозива для забезпечення високоякісного споживчого продукту з мінімальними витратами. Запропонована система може бути інтегрована з інформаційними системами підприємства. Запропонована архітектура експертно-моделюючої системи складається з окремих чотирьох структурних блоків: інтерфейс користувача; програмні модулі (математичний та алгоритмічний апарат, функції контролю якості та відповідності рецептури); бази даних та знань. Розроблений математичний та алгоритмічний апарат дозволяє за заданими якісними показниками змоделювати рецептуру морозива. Запропонований апарат базується на поєднанні методів оптимізації та використанні аналізу експертних даних.

Експертно-моделююча система забезпечує моделювання та корегування рецептури з урахуванням усіх властивостей доступних компонентів за рахунок використання бази знань та математичного апарату. При моделюванні рецептури без запропонованої експертної системи, а з використанням тільки математичного моделювання, то отримана рецептура не буде враховувати технологічні властивості.

Використання експертної системи у виробничих умовах дасть змогу постійно оновлювати та накопичувати знання експертів-технологів, які працюють у зазначеній сфері. Постійне накопичення нових знань про рецептури морозива дасть можливість створювати та розширювати партнерські програми з вітчизняними й зарубіжними підприємствами. Експлуатація експертної системи забезпечить скорочення витрат на моделювання нових рецептур морозива.

Економічний ефект від впровадження експертної системи, отриманий при використанні результатів науково-дослідних робіт і

закладений в базу знань експертно-моделюючої системи, забезпечує техніко-економічні показники підприємства за рахунок бережливих витрат на сировину і допоміжні матеріали.

ЛІТЕРАТУРА

1. Поліщук Г.Є., Бреус Н.М., Шевченко І.І., Гнізевич В.А., Юдіна Т.І., Ножечкіна-Єрошенко Г.М., Семко Т.В. Виявлення впливу казеїну на показники якості морозива з різним вмістом жиру. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2020. № 11. С. 24–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208954

2. Устименко І.М., Бреус Н.М., Поліщук Г.Є. Наукове обґрунтування складу емульсій, призначених для нормалізації молоковісних продуктів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2016. № 5. С. 183–188.

3. Goff H.D., Hartel W.R. Ice Cream. 7th ed. New York: Springer Science & Business Media, 2013. 462 p. DOI 10.1007/978-1-4614-6096-1_1

4. Поліщук Г. Є. Формування складних дисперсних систем молочного морозива з натуральними компонентами: дис. ...д-ра техн. наук: 05.18.04. Київ, 2013. 439 с.

5. Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidykh O.L., Polischuk G.Ye. Development of mathematical apparatus of the expert system for modelling ice cream recipes with specified quality parameters. *Science and innovation*. 2019. Vol. 15 (5). P. 57–66. DOI: 10.15407/scine15.05.069.

6. Липатов Н.Н., Рогов И.А. Методология проектирования продуктов питания с требуемым комплексом показателей пищевой ценности. *Известия вузов. Пищевая технология*. 1987. № 2. С. 9–15.

7. Тертычная Т.Н, Манжесов В.И., Ухина Е.Ю. Оптимизация рецептуры кекса. *Кондитерское производство*. 2007. № 1. С. 22–25.

8. Моделирование рецептур пищевых продуктов и технологий их производства: теория и практика. / О.Н. Красуля, С.В. Николаева, А.В. Токарев СПб.: ГИОРД, 2015. 320 с.

9. Олейникова А.Я., Магомедов Г.О., Плотникова И.В. Технологические расчеты при производстве кондитерских изделий. СПб.: РАПП. 2008. 240 с.

10. Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення. У 2-х ч. Ч.1: монографія / О.І. Черевко, М.І. Пересічний, С.М. Пересічна та ін.; за ред. О.І. Черевка, М.І. Пересічного. Харків: ХДУХТ, 2017, 962 с.

11. Донских Н.В. Разработка автоматизированной информационной системы для расчета и оптимизации рецептур. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2011. №2-3. С. 122–123.
12. Лисин П.А. Компьютерное моделирование поликомпонентных молочных продуктов. *Пищевая промышленность*. 2006. № 11. С. 60-61.
13. Сатина О.В., Юдина С.Б. Информационные технологии проектирования продуктов геронтологического питания. *Мясная индустрия*. 2010. № 6. С. 56–58.
14. Koroleva S.V. Practical aspects of using the desirability function in a biomedical experiment. *Modern problems of science and education*. 2011. №6. P. 71–71.
15. Миронова Н.Г., Ковбаса В.Н. Разработка оптимальных рецептур сухих завтраков с использованием математического моделирования. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 1998. № 1. С. 51–52.
16. Портал искусственного интеллекта. Экспертные системы. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/expert-systems/expert-systems.html> (дата звернення: 19.01.2022).
17. Бреус Н.М. Інформаційна технологія моделювання рецептур морозива: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. 138 с.
19. Токарев А.В., Красуля О.Н. Оптимизация управляющих воздействий в рецептурах колбасных изделий при наличии технологических дефектов. *Вестник ВГУИТ*. 2015. № 4. С. 66–71.
20. Sapiga V., Polischuk G., Breus N., Osmak T. Enzymatic destruction of protopectin in vegetable raw materials to increase its structuring ability in ice cream. *Ukrainian Food Journal*. 2021. № 10(2). P. 321–332. DOI: 10.24263/2304-974X-2021-10-2-9
21. Поліщук Г.Є., Бреус Н.М., Вовкодав Н.І., Раманаускас Р. Математическое моделирование активации функционально-технологических свойств яблочного пюре. *Maisto chemija ir technologija. Food chemistry and technology. Химия и технология пищи*. 2013. № 47. С. 45–52.
22. Polischuk G.E., Ivanov S.V., Breus N.M. Features of ice-cream foam structure formation. *Food science and technology*. 2014. Т. 2, № 27. С. 57–62.
23. Бреус Н.М., Маноха Л.Ю., Поліщук Г.Є. Обґрунтування доцільності створення гібридної експертної системи контролю якості заморожених продуктів десертного призначення. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2015. № 6. С. 109–116.

24. Expert Systems: The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century / T. L. Cornelius et al. Academic Press. 2009. 1947 p.

25. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирования. М.: Вильямс, 2007. 1152 с.

26. Wong B. K., Monaco J. A. Expert system applications in business: a review and analysis of the literature. *Information and Management*. 2013. №3. P. 141–152.

27. Сергиенко И.В. , Гуляницкий Л.Ф., Сиренко С.И. Классификация прикладных методов комбинаторной оптимизации. *Кибернетика и системный анализ*. 2009. № 5. С. 71–83.

28. Blum, C., Puchinger J., Raid, G. R., Roli A. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization. A survey. *Applied Soft Computing*. 2011. № 11(6). P. 4135–4151.

29. Hulianytskyi L.F., Sirenko S.I. Cooperative model-based metaheuristics. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2010. № 36, P. 33-40.

30. Raidl G.R. A unified view on hybrid metaheuristics. *Lect. Notes Computer Sci., Berlin: Springer-Verlag*, 2006. № 4030, P. 1–12.

31. Hrybkov S. V., Breus N. M., Polischuk G. Ye. Hybrid expert system to model the ice cream recipes. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2017. № 5 (2). P. 294–304. DOI: 10.24263/2310-1008-2017-5-2-13

Information about the authors:

Breus Natalie Mykolaivna,

Candidate of Technical Sciences,
Senior lecturer at the Department of Informatics
National University of Food Technologies
48, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

Hrybkov Serhii Vytaliiovych,

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Information Systems
National University of Food Technologies
48, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

Seidykh Olga Leonidivna,

Senior lecturer at the Department of Informatics
National University of Food Technologies
48, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine