

УДК 004.8:004.94

Шелудько А.О., Коротка Л.І.

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДСИСТЕМА ФОРМАЛІЗАЦІЇ НЕЧІТКОЇ ІНФОРМАЦІЇ У ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧАХ

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

Об'єктом розгляду роботи є моделювання деяких соціальних та інвестиційних процесів в умовах невизначеності. У роботі спроектовано та створено інформаційну підсистему для формалізації нечіткої інформації у деяких прикладних задачах, зокрема, розглядаються дві задачі: інвестування та розповсюдження епідемії. Розробка та реалізація інвестиційних проектів є вирішальними умовами соціального і економічного розвитку підприємств і зайнятості населення. Особливої уваги потребує вивчення інвестиційних стратегій в соціально значущих галузях регіональної економіки. Моделювання та прогнозування різного роду соціальних процесів є другою підзадачею роботи. Незважаючи на те, що наведені задачі є не пов'язаними між собою, але їх загальна особливість полягає у неповній вхідній інформації. У контексті постановки першої задачі: застосування методу чистої поточної вартості (дисконтованого доходу) обумовлено його перевагами в порівнянні з іншими методами оцінювання ефективності проектів, які будуються на використанні періоду відшкодування витрат або річної норми надходжень, оскільки він враховує весь термін функціонування проекту і графік потоку грошових коштів. Метод має достатню стійкість при різних комбінаціях вихідних умов, дозволяючи знаходити економічно раціональне рішення та отримувати найбільш узагальнену характеристику результату інвестування. Особливо це має вагоме значення, коли вхідні дані є нечіткими або інтервальними величинами. Для другої задачі: моделювання процесів соціального характеру, зокрема, розповсюдження епідемій повинно надавати можливість прогнозування ситуацій та їх подальшого розвитку. Для формалізації нечіткої вхідної інформації цієї задачі запропоновано застосувати інтервальні та двосторонні чисельні методи. У створеній інформаційній системі реалізована можливість роботи як з чіткими, так і з нечіткими вхідними величинами. В результаті виконання роботи було: зроблено огляд та аналіз існуючих методів і засобів вирішення поставлених задач; запропоновано для формалізації нечіткої вхідної інформації використовувати два підходи: математичний апарат теорії нечітких множин та інтервального аналізу; виконано імітаційне моделювання задач інвестування та розповсюдження епідемії; реалізовано чисельні експерименти у чіткій і нечіткій постановках; зроблено аналіз отриманих результатів чисельних експериментів.

Ключові слова: моделювання, чисельні методи інтервального аналізу, теорія нечітких множин, інвестиції, розповсюдження епідемії.

DOI: 10.32434/2521-6406-2018-4-2-81-88

Постановка проблеми

У роботі запропоновано розглядати дві задачі, які не є пов'язаними між собою, але їх особливістю є те, що вхідні змінні носять нечіткий характер. Для формалізації нечіткої вхідної інформації для цих задач запропоновано використовувати математичний апарат теорії нечітких

множин та інтервального аналізу.

Інвестиційна діяльність тою чи іншою мірою властива будь-якому підприємству. Вона являє собою один з найбільш важливих аспектів функціонування будь-якої комерційної організації. Причинами, що зумовлюють необхідність інвестицій, є відновлення наявної матеріально-

технічної бази, нарощування обсягів виробництва, освоєння нових видів діяльності. Тема інвестування є достатньо актуальною у будь-якому регіоні, тому автори вважають доцільним створення інформаційної підсистеми, яка б дозволяла моделювати процес інвестування як з чіткими, так і з нечіткими вхідними даними.

Принципи моделювання соціальних і епідеміологічних процесів істотно відрізняються від моделювання в природничих науках. Тут немає твердо встановлених експериментом і практикою залежностей, які завжди залишаються справедливими та не змінюються. При побудові моделей таких процесів необхідно враховувати початкову неточність завдання всіх даних, відсутність чіткого математичного опису змінних і параметрів, використовуваних при моделюванні [1]. Важливо розуміти можливість відхилення статистичних даних від їх реальних значень. Тому створення інформаційної підсистеми для моделювання таких процесів (особливо в умовах невизначеності) є важливим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літературних джерел та останніх досліджень надає можливість авторам стверджувати, що вказані прикладні задачі розв'язувались, як правило, з чіткими вхідними даними [2,3]. У роботі [3] розглянуто можливість розв'язку першої задачі з нечіткими даними з використанням елементів теорії нечітких множин. Слід зауважити, що створенню інформаційних систем, які б реалізовували вказані задачі з використанням інтервального аналізу та теорії нечітких множин у сучасних роботах не приділено достатньої уваги.

Застосування методу чистої поточної вартості (дисконтованого доходу) обумовлено його перевагами в порівнянні з іншими методами оцінки ефективності проектів, які будуються на використанні періоду відшкодування витрат або річної норми надходжень, оскільки він враховує весь термін функціонування проекту і графік потоку грошових коштів [2]. Метод має достатню стійкість при різних комбінаціях вихідних умов, дозволяючи знаходити економічно раціональне рішення і отримувати найбільш узагальнену характеристику результату інвестування [3].

Для моделювання поширення епідемій з'явився новий підхід, який використовує марківські випадкові процеси. Він дозволяє природним чином врахувати випадковий характер і оцінити відповідні параметри досліджуваного явища. За рахунок введення таких характеристик, як інтенсивності переходів між стадіями захворювання, з'являється можливість аналізу-

вати причини тих чи інших змін в ході захворювання. Ступінь відповідності прогнозу і спостережень оцінюється за статистичним критерієм Пірсона [4].

Авторами пропонується спроектувати та розробити інформаційну систему, яка дозволяє виконувати імітаційне моделювання для певного інвестиційного проекту та розповсюдження епідемії, працюючи з нечіткою інформацією.

Формулювання мети дослідження

Як вже зазначалося вище, у роботі для моделювання інвестиційних і соціально-епідеміологічних процесів розглядається дві не пов'язані між собою задачі: інвестування (статична система) та розповсюдження епідемії (динамічна система). Для формалізації нечіткої інформації вхідних змінних пропонується використовувати математичні апарати інтервального аналізу (ІА) та теорії нечітких множин (ТНМ). Необхідно спроектувати, розробити та реалізувати інформаційну систему, яка дозволяє проводити імітаційне моделювання при неповній вхідній інформації.

Виклад основного матеріалу дослідження

Постановка першої задачі інвестування: інвестиційний проект триває N років з певними інвестиціями для кожного року. Отримання прибутку від проекту починається відразу ж після закінчення проекту і закінчується через N років. Ставка дисконтованого відсотка залишається сталою протягом всього інвестиційного циклу. Інвестиції, прибуток і ставка дисконтованого відсотка є невизначеними параметрами, заданими нечіткими інтервалами. Знайти чисту наведену вартість всіх грошових потоків, пов'язаних з цим проектом.

Математичну модель задачі інвестування можна надати наступним чином:

$$NPV = \sum_{t=t_n}^T \frac{P_t}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^{t_c} \frac{KV_t}{(1+d)^t}, \quad (1)$$

де T – час реалізації інвестиційного проекту, роки; t_n – рік початку виробництва продукції, роки; d – норма дисконтування, %; P_t – чистий потік платежів (доходів) у році t , грн; t_c – рік закінчення робіт по проекту, роки; KV_t – інвестиційні витрати (капітальні вкладення) в році t , грн [3].

Дана система є статичною з нечіткими вхідними даними, тобто (1) є нечіткою математичною моделлю першої задачі.

Людство постійно стикається з раніше не-

відомими епідеміями, тому необхідні нові методи для зменшення темпів їх поширення. При моделюванні поширення епідемій можна використовувати кілька підходів: клітинні автомати, диференціальні рівняння, імітаційне моделювання тощо. Вони дозволяють досліджувати динаміку процесу розповсюдження, а також залежність тривалості епідемії, кількості перехворілих особин та інших показників від параметрів моделювання.

Розглянуті моделі недостатньо відображали імовірнісний характер поширення інфекції: в диференціальних моделях це явище представлялося як детермінований процес, а в клітинних автоматах випадковість зараження особин при контактах враховувалася за допомогою найпростішого вибору заражених сусідів методом Монте-Карло. Підсумкові імовірнісні характеристики поширення захворювання при цьому не розраховувалися.

Для імітаційного моделювання розповсюдження епідемії достатньо часто використовують універсальне середовище GPSS World. Процес розвитку епідемії надають у вигляді системи двох (або трьох) диференціальних рівнянь. Розв'язання системи відбувається за допомогою методу Рунге-Кутти-Фольберга [5]. Результати моделювання надаються у вигляді графіка для моделі розповсюдження епідемії. Але слід зазначити, що для роботи з цим середовищем користувач повинен вміти програмувати в середовищі, зокрема знати мову програмування PLUS.

Альтернативою середовищу GPSS World для моделювання розповсюдження епідемії можна вважати систему Matlab. Процес розповсюдження задається диференціальним рівнянням із запізнюючим аргументом. Найпростіший метод для вирішення такої задачі є метод послідовного інтегрування. Зазначений підхід до вирішення диференціальних рівнянь дозволяє покроково простежити сам хід розв'язання та оперативно вносити зміни на кожному кроці. Зазвичай, такий метод добре працює тільки при великих запізненнях і при невеликому числі кроків, так накопичення похибок при чисельному розв'язанні диференціальних рівнянь і апроксимації його розв'язку на кожному кроці призведе до великих відхилень від точного.

Зауважимо, що ні середовище імітаційного моделювання GPSS World, ні система Matlab не надає можливості працювати з нечіткою інформацією.

Постановка задачі розповсюдження епідемії: припустимо, що в одному з мікрорайонів

міста виникла епідемія і з'явилися інфекційні хворі. Для мікрорайону існує характерний приріст хворих людей. Припускалось, що приріст хворих за день пропорційний добутку числа здорових (ще не перехворілих та не маючих імунітету) на число хворих людей, тобто коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт розповсюдження епідемії). Коефіцієнт включає різного роду профілактичні заходи, прийняті під час епідемії. Необхідно визначити, як розвивається епідемія і яке буде число хворих через певний період часу.

Процес розповсюдження епідемії наданий системою диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x \cdot (K \cdot y - 1); \\ \frac{dy}{dt} = -K \cdot y \cdot x, \end{cases} \quad (2)$$

де x – кількість хворих людей на даний момент часу; y – кількість здорових людей на даний момент часу; K – швидкість розповсюдження епідемії.

Слід зауважити, що дана система є динамічною з нечіткими вхідними даними, тобто (2) є нечіткою математичною моделлю другої задачі.

Як зазначалося раніше, для формалізації нечіткої вхідної інформації в роботі запропоновано застосувати два підходи, а саме: класичну [6] інтервальну арифметику та α -рівневий принцип узагальнення.

Основним інструментом інтервального аналізу є так звані інтервальні арифметики – алгебри, що формалізують арифметичні операції над інтервалами як цілісними об'єктами. Характеристичною особливістю інтервального аналізу є розгляд множин невизначеності як самостійних цілісних об'єктів, за допомогою встановлення арифметичних, аналітичних операцій і відношень між ними [7].

У роботі без обмежень дослідження використано класичні трикутну та трапецієвидну функції належності зі зміщеними ядрами. Параметри цих функцій задаються користувачем та зберігаються у сховищі даних. У нашому випадку для визначеності кожна з цих функцій задана на множині $X=[0,10]$, в якості якого обраний замкнутий інтервал дійсних чисел (рис. 1, рис. 2). Ці функції використовуються для того, щоб завдати такі властивості множин, які характеризують невизначеність типу: «приблизно

дорівнює», «середнє значення», «розташований в інтервалі», «подібний до об'єкта», «схожий на предмет» та ін.

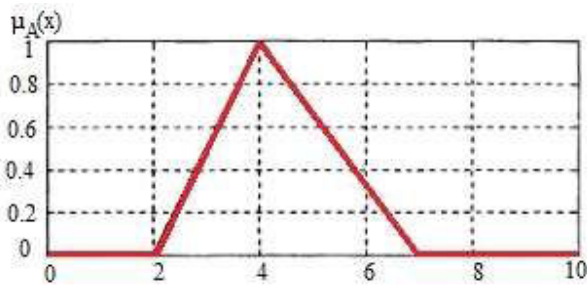


Рис. 1. Графік функції належності трикутної форми зі зміщеним ядром

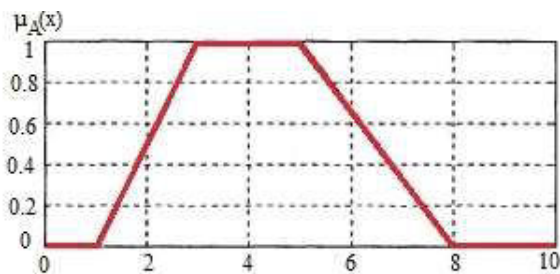


Рис. 2. Графік функції належності трапецієвидної форми зі зміщеним ядром

Як відомо, трикутна функція належності в загальному випадку може бути задана аналітично наступним виразом:

$$f_{\Delta}(x; a; b; c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{array} \right\}, \quad (3)$$

де a, b, c – деякі числові параметри, які приймають довільні дійсні значення і впорядковані відношенню $a \leq b \leq c$.

Трапецієвидна функція належності в загальному випадку може бути задана аналітично наступним виразом:

$$f_T(x; a; b; c; d) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 0, & d \leq x \end{array} \right\}, \quad (4)$$

де a, b, c, d – деякі числові параметри, які приймають довільні дійсні значення і впорядковані відношенню $a \leq b \leq c \leq d$.

При використанні теорії нечітких множин є можливість отримання чіткого (тобто дефазифікованого) значення розв'язку, у роботі без обмежень суджень використано центроїдний метод, який є достатньо нескладним у програмній реалізації.

Результатом роботи є спроектована інформаційна підсистема, яка дозволяє:

- отримувати дані інвестиційного проекту до десяти років (для статичної системи). Вибір того чи іншого описаного підходу залежить від особи, що приймає рішення. Зауважимо, що чисельні результати, які отримано за допомогою цих підходів практично збігаються, але при використанні нечітких множин є можливість отримати степінь впевненості експерта (тобто значення функції належності);

- проводити імітаційне моделювання процесу розповсюдження епідемії (тобто динамічна система), розраховувати кількість хворих через заданий термін спостереження.

Далі буде наведено результати роботи створеної інформаційної підсистеми, наприклад, форма введення інтервальних даних представлено на рис. 3 для першої задачі.

На рис. 4 зображено результат роботи програми у вигляді трапецієвидної функції належності. Також відображається дефазифіковане значення чистої наведеної вартості всіх грошових потоків, пов'язаних з інвестиційним проектом.

На рис. 5 продемонстрована форма для введення інтервальних даних та виведення розрахованої чистої наведеної вартості за допомогою математичного апарату інтервального аналізу.

Рис. 3. Форма для введения данных

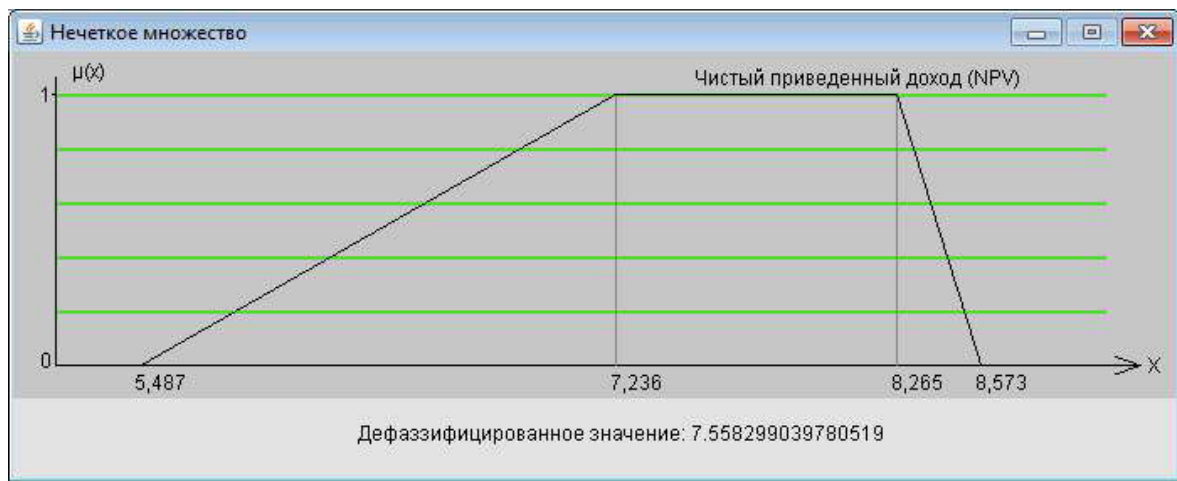


Рис. 4. Результат, відображений за допомогою трапецієвидного вигляду функції належності

Рис. 5. Форма для введения интервальных данных та відображення результату за допомогою ІА

У табл. 1 наведено розв'язок задачі з використанням ТНМ та ІА.

Аналіз результатів чисельного експерименту дозволяє зробити висновки, що запропонований підхід для формалізації неповної вхідної інформації із використанням математичного апарату інтервального аналізу та теорії нечітких множин можна застосовувати для розв'язання задач такого класу. На тестовій задачі отримані

чисельні результати дають достатньо непоганий збіг результатів.

Проведемо імітаційне моделювання розповсюдження епідемії. Введення параметрів моделі другої задачі відображає форму, яка представлена на рис. 6. Необхідно задати термін спостереження, кількість хворих та здорових людей і вказати коефіцієнт швидкості розповсюдження епідемії.

Таблиця 1

Результати чисельних експериментів для першої задачі

Вхідні дані		Результати моделювання			
		Чиста наведена вартість всіх грошових потоків, ум. од.			
Інвестиції кожного року, KV_i	$KV_0=\{2; 2,8; 3,5; 4\};$ $KV_1=\{0; 0,88; 1,50; 2\};$ $KV_2=\{0; 0; 0; 0\};$ $KV_3=\{0; 0; 0; 0\}.$	Застосування ІА	Застосування ТНМ		
			Носій нечіткої множини	Дефазифіковане значення вартості, ум од	Значення функції належності
Отриманий прибуток кожного року, P_i	$P_0=\{0; 0; 0; 0\};$ $P_1=\{0; 0; 0; 0\};$ $P_2=\{6,5; 7,5; 8,0; 8,5\};$ $P_3=\{5,5; 6,5; 7,0; 7,5\}.$				
Нечітке інтервальне значення дисконту, d	$d=\{0,08; 0,13; 0,22; 0,35\}$	$[5,49; 8,57]$	$[5,487; 8,573]$	7,55	1,0

Параметры модели

Время наблюдения дней

Количество больных, X

Количество здоровых, Y

Скорость распространения, K

Рис. 6. Форма для задания параметров динамической модели

На рис. 7 надано графік моделі розповсюдження епідемії при заданих параметрах (рис. 6). В правому верхньому куті вказано кількість хворих через заданий термін спостереження. За допомогою кнопок можливо подивитися кожний із побудованих графіків окремо. Можна відобразити графік нижньої та верхньої границь епідемії. Також можливе відображення динаміки розвитку та динаміки згасання епідемії.

Зауважимо, що у роботі реалізована можливість розв'язання цієї задачі у чіткій постановці, тоб то з точними вхідними даними. Для отримання результатів чисельного інтегрування застосовано класичні методи Рунге-Кутти, у тому



Рис. 7. Графік динаміки розповсюдження епідемії

Таблиця 2

Результати чисельних експериментів для другої задачі

Результати розв'язання задачі у чіткій постановці	Результати розв'язання задачі у нечіткій постановці
Пік епідемії на третій день	Пік епідемії на другий-п'ятий день
Максимальна кількість хворих на третій день: 25000 людей	Максимальна кількість хворих: від 25000 до 60000 людей

числі метод Ейлера. При розв'язанні задачі у нечіткій постановці використано двосторонні інтервальні чисельні методи.

Табл. 2 відображає результати розв'язання задачі у чіткій і нечіткій постановці.

Отримані результати чисельних експериментів у чіткій і нечіткій постановках дозволяють авторам стверджувати, що використання нечітких даних можливе для вирішення задач такого класу.

Висновки

У роботі запропоновано застосування двох підходів для формалізації нечіткої вхідної інформації: математичного апарату теорії нечітких множин та інтервального аналізу. Виконано проектування інформаційної підсистеми. Проведено імітаційне моделювання двох класів задач: інвестування та розповсюдження епідемії. Отримано результати у чіткій і нечіткій постановках та зроблено аналіз щодо результатів чисельних експериментів. Застосування запропонованих підходів формалізації неповної вхідної інформації є цілком доцільним для розв'язання прикладних задач.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
2. Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 144 с.
3. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология: монография. – М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004. – 397 с.
4. Voinov V., Alloyarova R., Pya N. A modified chi-squared goodness-of-fit test for the three-parameter Weibull distribution and its applications in reliability // Mathematical Methods for Reliability, Survival Analysis and Quality of Life. – London: Hermes. – 2007. – P.193-206.
5. Томашевский В.Н., Жданова Е.Г. Имитационное моделирование в среде GPSS. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
6. Зелеников Д.Г., Короткая Л.И. Технологии вычисли-

тельного интеллекта в задачах моделирования динамических систем: монография. – Днепр: Баланс-Клуб, 2018. – 178 с.

7. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. – Новосибирск: Издательство «XYZ», 2018. – 597 с.

Надійшла до редакції 24.10.2018

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДСИСТЕМА ФОРМАЛИЗАЦИИ НЕЧЁТКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ

Шелудько А.А., Короткая Л.И.

Объектом рассмотрения работы является моделирование некоторых социальных и инвестиционных процессов в условиях неопределённости. В работе спроектировано и создано информационную подсистему для формализации нечёткой информации в некоторых прикладных задачах, в частности, рассматриваются две задачи: инвестирование и распространение эпидемии. Разработка и реализация инвестиционных проектов являются решающими условиями социального и экономического развития предприятий и занятости населения. Особого внимания требует изучение инвестиционных стратегий в социально значимых отраслях региональной экономики. Моделирование и прогнозирование разного рода социальных процессов является второй подзадачей работы. Несмотря на то, что приведённые задачи являются не связанными между собой, но их общая особенность заключается в неполной входящей информации. В контексте постановки первой задачи: применение метода чистой текущей стоимости (дисконтированного дохода) обусловлено его преимуществами по сравнению с другими методами оценки эффективности проектов, которые строятся на использовании периода возмещения расходов или годовой нормы поступлений, поскольку он учитывает весь срок функционирования проекта и график потока денежных средств. Метод обладает достаточной устойчивостью при разных комбинациях исходных условий, позволяя находить экономически рациональное решение и получать наиболее обобщённую характеристику результата инвестирования. Особенно это имеет большое значение, когда входные данные являются нечёткими или интервальными величинами. Для второй задачи: моделирование процессов социального характера, в частности, распространения эпидемий, должно предоставлять возможность прогнозирования ситуаций и их дальнейшего развития. Для формализации нечёткой исходной информации этой задачи предложено применить интервальные и двусторонние численные методы. В созданной информационной системе реализована возможность работы как с чёткими, так и с нечёткими входными величинами. В результате выполнения работы было сделано обзор и анализ существующих методов и средств решения поставленных задач; предложено для формализации нечёткой исходной информации использовать два подхода: математический аппарат теории нечётких множеств и интервального анализа; проведено имитационное моделирование задач инвестирования и распространения эпидемии; реализовано многочисленные эксперименты в чёткой и нечёткой постановках; сделан анализ полученных результатов численных экспе-

риментов.

Ключевые слова: моделирование, численные методы интервального анализа, теория нечётких множеств, инвестиции, распространение эпидемии.

INFORMATION SUBSYSTEM OF FORMALIZATION OF FUZZY INFORMATION IN APPLIED PROBLEMS

Sheludko A.A., Korotka L.I.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The object of consideration of the work is the modeling of some social and investment processes in conditions of uncertainty. Authors designed and created an information subsystem for the formalization of fuzzy information in some applied problems, in particular, two problems are considered: investment and the spread of the epidemic. The development and implementation of investment projects are crucial conditions for the social and economic development of enterprises and employment. Special attention should be paid to the study of investment strategies in socially significant sectors of the regional economy. Modeling and forecasting various kinds of social processes is the second subtask of work. Despite the fact that the tasks are not related to each other, their common feature is incomplete input information. In the context of the first task: the use of the net present value method (discounted income) is due to its advantages over other methods of evaluating the effectiveness of projects that are based on the use of a reimbursement period or annual rate of income, since it takes into account the entire life of a project and the cash flow means. The method has sufficient stability under different combinations of initial conditions, allowing one to find an economically rational solution and obtain the most generalized characteristic of the investment result. This is especially important when the input data is fuzzy or interval values. For the second task: the modeling of social processes, in particular, the spread of epidemics, should provide the ability to predict situations and their further development. To formalize the fuzzy initial information of this problem, it is proposed to apply interval and two-sided numerical methods. The created information system implements the ability to work with both clear and fuzzy input values. As a result of the work done, a review and analysis of existing methods and means of solving the set tasks was made; it was proposed to use two approaches to formalize fuzzy source information: the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets and interval analysis; simulation modeling of the investment and the spread of the epidemic was implemented; numerous experiments in clear and fuzzy settings were implemented; the analysis of the results of numerical experiments is made.

Keywords: modeling, numerical methods for interval analysis, the theory of fuzzy sets, investment, the spread of the epidemic.

REFERENCES

1. Kudryavtsev E.M. GPSS World. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem* [GPSS World. Basics of simulation of various systems]. Moskva: DMK Press, 2004, 320 p. (in Russian).
2. Kovalev V.V. *Metody otsenki investitsionnykh proektov* [Methods for evaluating investment projects]. Moskva: Finansy i statistika, 2008, 144 p. (in Russian).
3. Diligenskiy N.V. *Nechetkoe modelirovanie i mnogokriterial'naya optimizatsiya proizvodstvennykh sistem v usloviyakh neopredelennosti: tekhnologiya, ekonomika, ekologiya: monograf.* [Fuzzy modeling and multi-criteria optimization of production systems in conditions of uncertainty: technology, economics, ecology: monograph]. Moskva: «Izdatel'stvo Mashinostroenie – 1», 2004, 397 p. (in Russian).
4. Voinov V., Allozarova R., Pya N. A modified chi-squared goodness-of-fit test for the three-parameter Weibull distribution and its applications in reliability. *Mathematical Methods for Reliability, Survival Analysis and Quality of Life*. London: Hermes, 2007, pp.193-206.
5. Tomashevskiy V. *Imitatsionnoe modelirovanie v srede GPSS* [Simulation modeling in the environment of GPSS]. Moskva: Bestseller, 2003, 416 p. (in Russian).
6. Zelentsov D.G., Korotkaya L.I. *Tekhnologii vychislitel'nogo intellekta v zadachakh modelirovaniya dinamicheskikh sistem: monografiya* [Technologies of computational intelligence in modeling problems of dynamic system]. Dnepro: Balans-Klub, 2018, 178 p. (in Russian).
7. Sharyy S.P. *Konechnomernyy interval'nyy analiz* [Finite Interval Analysis]. Novosybyrsk: Izdatel'stvo «XYZ», 2018, 597 p. (in Russian).