

УДК 004.8

К.Ю. ЧОРНОБАЙ*, С.В. ГРИБКОВ*, О.Л. СЕДИХ*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАНУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА Й ПОСТАЧАННЯ МОЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

*Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена дослідженню сучасних тенденцій розвитку молочної промисловості з акцентом на інтеграцію математичного моделювання та інструментів штучного інтелекту у процеси планування виробництва й постачання продукції. У статті запропоновано математичну модель планування виготовлення молочної продукції, яка враховує баланс між наявними запасами сировини та потребами виробництва, терміни придатності готової продукції, мінімально рентабельні та максимально допустимі обсяги виробництва, а також витрати на зберігання і транспортування. Модель належить до класу багатокритеріальних NP-складних задач, що вимагає застосування сучасних оптимізаційних алгоритмів і методів наближеного розв'язання. Вона орієнтована на мінімізацію витрат усього виробничо-логістичного ланцюга та формування оптимального асортиментного набору продукції для різних груп споживачів. Значна увага приділена необхідності гнучкого управління замовленнями, коли диспетчери та технологи узгоджують напрями використання сировини, забезпечуючи виконання як внутрішніх, так і експортних контрактів у великих партіях. Також проведено дослідження робіт по використанню штучного інтелекту та бібліотек для аналізу даних, які будуть включені у створювану систему підтримки прийняття рішень. Автори підкреслюють, що поєднання математичних методів та технологій штучного інтелекту формує нову парадигму управління у молочній промисловості, яка відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та цифрової трансформації харчової галузі. Запропонована математична модель і обґрунтовані інструменти її реалізації можуть стати основою для розробки інноваційних систем підтримки прийняття рішень, які сприятимуть зростанню конкурентоспроможності молокопереробних підприємств на внутрішньому та світовому ринках.

Ключові слова: математична модель, машинне навчання, планування, молочна промисловість, харчова промисловість, штучний інтелект.

Abstract. The article is devoted to the study of current trends in the development of the dairy industry with an emphasis on the integration of mathematical modeling and artificial intelligence tools into the processes of production planning and product supply. The paper proposes a mathematical model for planning the production of dairy products, which takes into account the balance between available raw material stocks and production needs, the shelf life of finished products, the minimum profitable and maximum permissible production volumes, as well as storage and transportation costs. The model belongs to the class of multi-criteria NP-hard problems, which requires the use of modern optimization algorithms and approximate solution methods. It is focused on minimizing the costs of the entire production and logistics chain and forming an optimal product range for different consumer groups. Considerable attention is paid to the need for flexible order management, where dispatchers and technologists coordinate the use of raw materials, ensuring the fulfillment of both domestic and export contracts in large batches. Research has also been conducted on the use of artificial intelligence and libraries for data analysis, which will be included in the decision support system being developed. The authors emphasize that the combination of mathematical methods and artificial intelligence technologies forms a new management paradigm in the dairy industry that meets the modern requirements of sustainable development and digital transformation of the food industry. The proposed mathematical model and well-founded tools for its implementation can become the basis for the development of innovative decision

support systems that will contribute to the growth of competitiveness of milk processing enterprises in domestic and global markets.

Keywords: mathematical model, machine learning, planning, dairy industry, food industry, artificial intelligence.

DOI: 10.34121/1028-9763-2025-3-4-127-136

1. Вступ

Харчова промисловість займає ключову роль в усіх сферах будь-якої держави. Незважаючи на зовнішні збурення та внутрішні потрясіння, люди постійно харчуються, а з кожним роком вимоги до харчових продуктів зростають, адже споживання якісної продукції впливає на здоров'я і довголіття людей. Одним із важливих напрямів харчової промисловості є молочна промисловість. Готова продукція, яка випускається на основі молока, дуже різноманітна і може використовуватися як інгредієнт для подальшого використання, так і як самостійний продукт для споживання. Технологічні процеси виготовлення продукції мають різні аспекти, а також прямо залежать від характеристик сировини, яка насамперед має обмежений термін придатності, незважаючи на сучасний розвиток технологій, направлених на збереження якісної сировини протягом тривалого часу. Крім того, кінцевий продукт теж вимагає дотримання технологічних вимог при збереженні. Вживання продукції молочної промисловості займає вагоме місце у харчовому споживанні населення, адже молочна продукція корисна й насичена великою кількістю корисних речовин. Хоча необхідно відмітити, що за останні 10–15 років збільшилася кількість людей, у яких виникло неперенесення лактози.

Управління виготовленням молочної продукції починається від визначення фізико-хімічних та мікробіологічних показників до відправки готової продукції до замовника. Адже в залежності від вмісту жиру і білка, кислотності, щільності тощо визначається технологічна карта отримання кінцевого продукту, а потім формується оптимальний асортиментний набір для відправки до певних замовників, оскільки відправка продукції відбувається партіями в різному асортименті. Такий процес постійно контролюється спеціалістами, які повинні обрати правильну траєкторію перетворення сировини в готовий продукт для забезпечення потреб кінцевого споживача.

Незважаючи на розвиток сучасних інформаційних технологій, оперативне управління молокопереробним процесом постійно вимагає присутності диспетчерів, які постійно перевіряють отриману інформацію про сировину та, маючи актуальні замовлення від супермаркетів та інших підприємств, намагаються задовольнити потреби споживача. В сучасних реаліях, як правило, розподіл базується на загальних показниках, згодом, коли сировина потрапляє на молокозавод, технологи визначають актуальні показники, що приводить до коригування технологічної обробки, а саме: регулювання вмісту жиру, сепарація, зниження температури тощо. Все це може збільшувати час на виготовлення кінцевого продукту.

Метою даного дослідження є побудова математичної моделі виготовлення молочної продукції для подальшого її використання при формуванні оптимального плану з метою забезпечення виконання замовлень та отримання максимального прибутку.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

- дослідити процес виготовлення молочної продукції та побудувати математичну модель цього процесу;
- дослідити та запропонувати технології й методи по удосконаленню цього процесу.

2. Моделювання та результати

Виробництво молочної продукції на сучасних промислових підприємствах є строго регламентованою послідовністю технологічних операцій, спрямованих на забезпечення безпеки, стабільності та відповідності фізико-хімічних та органолептичних показників вимогам нормативної документації. Процес бере свій початок з етапу приймання сировини, де молоко-сировина, що надходить автоцистернами, піддається суворому контролю якості. Цей контроль включає органолептичну оцінку (колір, запах, смак, консистенція), визначення фізико-хімічних показників (масова частка жиру, білка, сухих речовин, кислотність, густина) та оцінку мікробіологічної безпеки (кількість мікроорганізмів та інших речовин). Сировина, що не відповідає встановленим критеріям, відбраковується [1, 2].

З різних виробничих центрів молоко транспортується на молочні заводи молоково-зами. Після пастеризації воно використовується для виробництва різних молочних продуктів. Пастеризація застосовується для видалення бактерій із молока та для подовження терміну придатності сировини. Ідеальне молоко має значення кислотності (рН 6,7), якщо це значення нижче або вище, молоко вже не свіже або отримано з порушенням сантехнічних норм, відхилення показника кислотності також може вказувати на хворобу корів. Повторне охолодження дозволяє уникнути псування молока. Як правило, процедура охолодження проводиться на молочній станції і в подальшому спрямовує транспортний засіб до пункту сортування, перш ніж молоко зіпсується [3]. У багатьох випадках на цьому ж етапі здійснюється стандартизація за жиром, яка полягає в регулюванні масової частки молочного жиру до заданого значення шляхом сепарування частини молока на вершки та знежирене молоко з подальшим їх змішуванням у необхідній пропорції або додаванням вершків до цільного молока.

Наступними ключовими етапами термічної та механічної обробки є пастеризація та гомогенізація. Пастеризація здійснюється різними способами для знищення усіх патогенних мікроорганізмів та інактивації ферментів, що сприяють псуванню продукту. Гомогенізація, яка може передувати або слідувати за пастеризацією, полягає в пропусканні молока під високим тиском через щільний гомогенізатор. Це приводить до дроблення великих жирових кульок на дрібніші, що забезпечує стабільність емульсії, запобігає відстоюванню вершків та покращує консистенцію і засвоюваність продукту.

Для виробів, що зазнають біологічної трансформації (йогурти, кефір, сирки, сметана), наступним етапом є заквашування та ферментація. Після охолодження пастеризованої та гомогенізованої суміші до температури, оптимальної для розвитку стартерної культури, в неї вноситься визначена кількість закваски, що містить стійкі штами молочнокислих бактерій та, за необхідності, дріжджів або певних бактерій (для кефіру, кумису). Процес ферментації протікає у герметичних резервуарах з теплоізоляцією та контролем температури протягом заданого часу (від 4 до 14 годин залежно від продукту), до досягнення необхідного значення активної кислотності та утворення структурного гелю коагульованого казеїну внаслідок молочнокислого бродіння та зниження рН до ізоелектричної точки казеїну (рН ~4.6). Для деяких продуктів (сирки, частина йогуртів) після ферментації може проводитися дезодорація (видалення летких компонентів) та перемішування гелю для досягнення однорідної консистенції [2].

Фасування здійснюється на високошвидкісних автоматизованих лініях в умовах, що мінімізують ризик повторної контамінації мікроорганізмами (асептичне середовище, стерилізована тара). Використовуються різноманітні види упаковки: ПЕТ-пляшки, картонна комбінована тара (Tetra Pak), стаканчики з полімерних матеріалів, фольговані пакети. Після упакування продукт, що не потребує додаткової термообробки (йогурти, кефір, сметана), негайно охолоджується до температури зберігання $4\pm 2^{\circ}\text{C}$ у холодильних камерах для інгібування процесів молочнокислого бродіння та збереження консистенції, органолептичних властивостей та безпеки протягом встановленого терміну придатності. Продукти,

що зазнають ультрапастеризації або стерилізації після фасування (молоко, деякі десерти), можуть зберігатися при кімнатній температурі протягом значно довшого часу завдяки повній інактивації мікрофлори та ферментів. Кожна партія готової продукції проходить повторний контроль відповідності усім нормативним вимогам перед відправленням на реалізацію [2].

Необхідно відмітити, що описаний вище технологічний процес відбувається вже на підприємстві, а планування виготовлення відбувається при надходженні замовлення на виготовлення продукції на підприємство.

Диспетчер в оперативному режимі визначає, куди буде направлена певна машина з сировиною для виготовлення замовленого продукту. Розподіл відбувається на основі загального плану виготовлення продукції, а також зайнятості поточних ліній. Замовлення поєднуються між собою в залежності від асортименту у групи так, щоб забезпечити оптимальне використання виробничих потужностей та мінімізувати витрати на виготовлення продукції. Необхідно відмітити, що виробничі потужності мають як мінімальний, так і максимальний обсяг виготовлення, адже якщо виготовляти менше мінімально рентабельного обсягу, то підприємство буде у збитку. Технологічні лінії мають максимальний обсяг виготовлення. Наприклад, при виготовленні кисломолочного сиру на процес заквашування може стояти обмеження на ємність.

Початок керування диспетчером сировини відбувається як тільки надходить інформація, що на підприємство рухається певна машина з певною кількістю сировини. Диспетчер узгоджує з головним технологом асортимент виготовлення відповідно до поточних замовлень на поточну дату. Також диспетчери займаються розподіленням готової продукції. У відповідності з замовленням формується партія на відвантаження. Партії формуються так, щоб забезпечити мінімізацію витрат на транспортування продукції з урахуванням розташування замовників. Як правило, диспетчери використовують інформаційні системи, які забезпечують підказки та інформативно відображають замовлення на певні дати, завантаження технологічних ліній до певного часу та дати закінчення технологічного процесу. Також є можливість визначити час і дату початку виготовлення нової продукції на цій лінії в залежності від асортименту. Суттєвим мінусом є те, що більшість підприємств використовують інформаційні технології, які в реальному часі відображають поточний стан завантаження технологічних ліній та замовлення, але не використовують інформаційні системи для коригування плану виготовлення. Адже, якщо використати такий підхід, то можливо прибрати людський фактор і пришвидшити оптимальне реагування на виникнення позаштатних ситуацій.

Будь-якому підприємству дуже вигідно здійснювати виготовлення великими партіями продукції в асортименті. Наприклад, підприємство Данон здійснює виготовлення та реалізацію готової продукції як в межах України, так і на експорт. Якщо говорити про експорт продукції, то він здійснюється великими партіями, що дуже вигідно виробнику. Особливість постачання готової продукції полягає в тому, що необхідно використовувати спеціальні транспортні засоби з холодильними камерами для забезпечення якості готової продукції і враховувати її пакування та фасування.

Необхідно зазначити, що існують три основні проблеми, які необхідно розв'язати перед створенням математичної моделі складної системи:

- насамперед повинна бути певна мета створення моделі, тому що модель відображає оригінал не у всій його повноті (це неможливо, тому що модель кінцева, а будь-який об'єкт невичерпний), а лише ті аспекти оригіналу, які пов'язані з досягненням поставленої мети;

- повинен бути обраний тип моделі, виходячи з двох взаємозалежних вимог: по-перше, модель повинна адекватно відображати актуальний стан оригіналу, і, по-друге, во-

на повинна забезпечувати формування алгоритму перетворення об'єкта керування з поточного стану в цільовий;

– модель повинна бути проста в реалізації, тобто вимагати для своєї реалізації мінімальних обчислювальних та інших видів ресурсів.

На основі проаналізованої літератури [4–7] та враховуючи вищезазначене, опишемо математичну модель планування виготовлення та постачання готової продукції. Планування розглядається на момент часу $t = 1, 2, \dots, T$, де T — кінцеве значення періоду.

Представимо попит на певний вид продукції $D_k(t)$, де k — вид продукції, який може змінитися динамічно на момент часу t . А види продукції представляють собою множину $k = 1 \dots K$, де K — кількість видів продукції. Продукція має обмежений термін придатності, тому залишки на складі з часом втрачають якість, а складські приміщення мають обмеження. Обсяг готової продукції на закінчення періоду t відображено в формулі 1.

$$S(t) = \sum_{k=1}^K [S_k(t-1) + y_k(t) - v_k(t)], \quad (1)$$

де $S_k(t-1)$ — обсяг залишку готової продукції k виду на кінець попереднього моменту часу $(t-1)$;

$y_k(t)$ — обсяг готової продукції k виду на момент часу t ;

$v_k(t)$ — обсяг відвантаженої продукції k виду на момент часу.

Виготовлена продукція на момент часу t може бути відразу відправлена замовнику, що зменшує витрати на зберігання готової продукції, але підприємство повинно забезпечити зберігання готової продукції, як мінімум, в обсязі $S(t)$. Враховуючи, що для мінімізації витрат на транспортування готової продукції до одного замовника необхідно зібрати декілька видів продукції у відповідному обсязі, забезпечити зберігання готової продукції, якщо це дозволяють терміни придатності та умови замовлення. Тому при складанні плану виготовлення продукції та її постачанні необхідно мінімізувати витрати на зберігання готової продукції, що доцільно описати виразом 2.

$$Fz = d_k * y'_k(t) * g_k \rightarrow \min, \quad (2)$$

де d — кількість годин зберігання готової продукції k виду;

$y'_k(t)$ — обсяг готової продукції k виду на момент часу t , що потребує зберігання;

g_k — вартість зберігання продукції k виду.

При цьому необхідно дотримуватися того, щоб на момент часу t був повністю задоволений попит споживача $D_k(t)$, тобто виконувалась умова за виразом 3, що означає, що обсяг виготовленої продукції завжди повинен бути більший або дорівнювати попиту на момент часу t .

$$S(t) \geq D_k(t). \quad (3)$$

Крім того, обов'язково повинен бути дотриманий баланс сировини, який передбачає наявність сировини на момент t не менше, ніж необхідно для виготовлення продукції. Це описано виразом 4.

$$Sx(t-1) + \sum_{i=1}^N x_i(t) = \sum_{k=1}^K [a_k * y_k(t)], \quad (4)$$

де $Sx(t-1)$ — сумарні залишки сировини за попередній момент часу;

$x_i(t)$ — обсяг сировини, що надходить від i постачальника, а усі постачальники представляються множиною $i = 1 \dots N$ за період t ;

a_k — норми витрат сировини на виготовлення продукції k виду;

$y_k(t)$ — обсяг готової продукції k виду на момент t .

На виготовлення $y_k(t)$ продукції k виду на момент t (4) потрібно врахувати обмеження, які пов'язані з виробничими потужностями та мінімальним рентабельним обсягом виготовлення певного виду продукції. Обмеження на оптимальний обсяг виготовлення $y_k(t)$ продукції k виду на момент t представлено в виразі 5.

$$C_k(t) \leq y_k(t) \leq P_k(t), \quad (5)$$

де $C_k(t)$ — мінімальний обсяг продукції k виду, який можливо виготовити на момент t , щоб він був рентабельним;

$P_k(t)$ — максимально можливий обсяг продукції k виду, який можливо виготовити на момент t .

Основною задачею є мінімізація витрат за весь період T на виготовлення та постачання продукції, що описується виразом 6.

$$F_T = \sum_{k=1}^K [sb_k * y_k(t) + d_k * y'_k(t) * g_k + y_k(t) * vd_{ki}] + \sum_{i=1}^N (y_k(t) * vd_{ki} * -b_i) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де vd_{ki} — вартість доставки до i -го замовника;

b_i — розмір штрафу, прописаний у договорі, який необхідно відшкодувати замовнику, якщо буде порушено термін виконання замовлення.

Розроблена математична модель дає змогу оцінити та побудувати оперативно-календарний план виконання замовлень, а дана задача належить до класу багатокритеріальних NP -складних комбінаторних задач [4–7].

Складність розв'язання такої задачі зростає з кількістю замовлень, а також зі збільшенням етапів різних варіантів виконання на різних технологічних потужностях підприємства.

Основною задачею управління, що вимагає комплексного врахування цілей та обмежень усіх ієрархічних рівнів, є оперативна корекція виробничого плану з метою гарантованого виконання замовлень. Історично такі задачі вирішувалися шляхом їх декомпозиції на відповідні рівні. Даний підхід зазвичай передбачав обмеження лише ключовими критеріями та функціями з урахуванням основних обмежень, що призводило до втрати адекватного відображення комплексної взаємодії всіх впливових факторів.

Оптимальність виробничого плану визначається його здатністю забезпечити максимізацію прибутку за встановлений часовий інтервал. Такий оптимальний план виконання замовлень повинен відповідати загальній стратегії підприємства, мінімізувати змінні витрати виробництва та забезпечувати максимально ефективне використання наявного виробничо-технологічного обладнання.

Необхідність оперативної реконфігурації поточного плану виробництва виникає внаслідок таких типових ситуацій:

- наявність потреби інтеграції у виробничий процес нового високопріоритетного замовлення, що надійшло вже після формування поточного плану;

- виникнення позапланових збоїв, пов'язаних із порушенням графіків постачання сировини та матеріалів, відмовами або зміною стану технологічного обладнання, а також

невиконанням умов договірних зобов'язань із боку постачальників, адже все це обумовлено соціально-економічними факторами.

Подальше рішення задачі потребує використання машинного навчання для управління запасами сировини та готової продукції, аналізу попиту та якісних показників сировини. Тому доцільно в сучасних реаліях використовувати машинне навчання та штучний інтелект.

Розроблена математична модель дає змогу оцінити та побудувати оперативно-календарний план виконання замовлень, а дана задача належить до класу багатокритеріальних NP-складних комбінаторних задач. Вона може бути розв'язана як класичними методами, так і з використанням сучасних модифікованих методів. Необхідно відмітити, що переробка молока повністю залежить від фізико-хімічних показників сировини, а вони наперед можуть критично змінюватися від партії до партії. Тому при виробництві деяких видів молочної продукції використовують експертні системи, що дає змогу більш ефективно використовувати сировину [8].

Одним із найпопулярніших напрямів за останні роки є використання штучного інтелекту та модифікованих алгоритмів оптимізації.

Автор статті [9] проводить оглядовий аналіз ролі штучного інтелекту в управлінні підприємств харчової промисловості з акцентом на його потенціал для оптимізації процесів, підвищення ефективності та забезпечення стійкості в умовах кризи. Автор підкреслює трансформаційний потенціал ШІ для підвищення продуктивності, зменшення витрат, покращення якості та стійкості, а також адаптації до мінливих споживчих потреб. Сильні сторони статті полягають у її актуальності та міждисциплінарному підході, що поєднує менеджмент, технології ШІ та специфіку харчової промисловості. З недоліків необхідно виділити те, що стаття має більш описовий характер, без оригінальних емпіричних даних чи моделювання, і покладається на узагальнення з попередніх публікацій автора. Робота є корисним вступним оглядом, що ініціює дискусію про інтеграцію ШІ в харчову промисловість, але потребує подальшого розвитку через емпіричні дослідження та ширший критичний аналіз.

Стаття [10] являє собою оглядовий матеріал, який аналізує трансформаційний вплив штучного інтелекту на харчову промисловість у міжнародному контексті. Наведено багато результатів обробки статистичної інформації, що ілюструє потенціал ШІ для стійкості, ефективності та інновацій, з посиланнями на реальні приклади та технології (IoT, блокчейн), сприяючи розумінню глобальних тенденцій. Ця робота є інформативним оглядом для професіоналів гастрономії та бізнесу, що стимулює дискусію про інтеграцію ШІ, але потребує доповнення академічними джерелами для глибшого аналізу та має обмеження об'єктивності через маркетинговий характер.

Робота [11] присвячена застосуванню штучного інтелекту (ШІ) для підвищення ефективності, зменшення відходів та покращення якості й безпеки харчової продукції в процесі управління процесами в сільському господарстві та харчовій промисловості. В ній розглядаються ключові аспекти використання ШІ для оптимізації ланцюгів постачання та переробки харчових продуктів, контролю якості, персоналізації харчування та безпеки харчових продуктів. Автори аналізують сучасні досягнення ШІ-технологій, як-от машинне навчання, комп'ютерний зір, робототехніка та Інтернет речей, надаючи конкретні приклади їх впровадження у період 2010–2023 років. У статті також висвітлюються виклики, зокрема високі витрати на впровадження, проблеми з точністю та етичні аспекти, а також окреслюються перспективи розвитку ШІ для забезпечення сталості та інновацій в агрохарчовому секторі.

Автори роботи [3] провели дослідження про впровадження штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення ефективності й якості в різних сегментах харчової промисловості. Застосування ШІ у харчовій галузі розглядається у контексті оптимізації

ланцюгів постачання, управління виробництвом та прогнозування попиту. Автори виділяють застосування ШІ в молочній промисловості для оптимізації процесів, як-от контроль якості молока, прогнозування термінів придатності та автоматизація пастеризації, що сприяє зменшенню втрат і підвищенню поживної цінності продуктів. Методи машинного навчання та аналізу великих даних дозволяють здійснювати більш точний контроль якості сировини і готової продукції, мінімізувати втрати та зменшувати ризики дефектів.

У статті [12] розглядаються концептуальні особливості вирішення актуальної проблеми ефективного вирішення складних оптимізаційних задач (неопуклість цільової функції, її перервність, динамічність та стохастичність, а не просто багатоекстремальність) в управлінні корпорацією та підприємством із метою підвищення ефективності та конкурентоздатності корпорацій і підприємств в умовах кризових явищ.

Для розв'язку поставленої задачі авторами розглядається застосування бібліотек мовою Python для машинного навчання, що необхідно для створення і навчання алгоритмів, здатних навчатися на даних і робити прогнози або готувати рішення. Поширеними бібліотеками є [13]:

- NumPy — призначена для виконання різноманітних математичних операцій над великими багатовимірними масивами та матрицями.

- SciPy — орієнтована на великі набори даних, а також на виконання наукових і технічних обчислень, крім того використовується для обробки зображень і надає базові функції обробки для високорівневих ненаукових математичних функцій.

- TensorFlow — має широкий спектр застосування, але особливістю є використання для навчання глибоких нейронних мереж.

- Keras — забезпечує побудову нейронних мереж та їх оцінку, працює з найпоширенішими типами даних.

- PyTorch — вважається найкращим фреймворком машинного і глибокого навчання з високою швидкістю виконання, дуже гнучка, здатна працювати на простих процесорах або центральних і графічних процесорах.

- Scikit-learn — легко інтегрується з іншими бібліотеками програмування машинного навчання, підтримує різні алгоритми, включаючи класифікацію, регресію, кластеризацію та багато інших.

- Pandas — швидкий, потужний, гнучкий і простий у використанні інструмент аналізу й обробки даних

- Statsmodels — застосовується для статистичного аналізу даних і надає безліч методів для різних завдань, як-от лінійні та узагальнені лінійні моделі, аналіз часових рядів, аналіз виживаності, аналіз дисперсії, тестування гіпотез, оцінка параметрів. Крім того, вона має інструменти для візуалізації даних, діагностики моделей, порівняння моделей.

Зазначені бібліотеки будуть використані в системі підтримки прийняття рішень для розв'язку багатокритеріальних задач прийняття рішень в умовах невизначеності для підприємств молочної промисловості.

3. Висновки

У статті розглянуто ключові аспекти функціонування молочної промисловості. Розроблена та обґрунтована математична модель для оптимізації процесів виробництва і постачання продукції. Проаналізовано повний технологічний цикл — від приймання та первинного контролю сировини до фасування і відвантаження готової продукції. Запропонована математична модель дозволяє врахувати обмеження виробничих потужностей, терміни придатності продукції, баланс сировини та попит споживачів, що забезпечує можливість формування оптимального балансу сировини та готової продукції з мінімізацією витрат.

Особливу увагу приділено необхідності використання сучасних інформаційних технологій та інструментів машинного навчання на основі бібліотек Python, які дають

змогу здійснювати гнучке планування, прогнозування попиту й автоматичну корекцію виробничих планів у реальному часі.

Отже, результати дослідження мають вагоме практичне значення для розвитку молочної промисловості, оскільки запропонована модель не лише відображає реальні процеси, але й надає інструменти для їх оптимізації в умовах невизначеності.

Вона може бути інтегрована у сучасні системи підтримки прийняття рішень, що забезпечить підвищення конкурентоспроможності підприємств, ефективне використання ресурсів та задоволення потреб кінцевого споживача на високому рівні якості.

Отримані результати будуть включені в систему підтримки прийняття рішень для розв'язку багатокритеріальних задач прийняття рішень в умовах невизначеності для підприємств молочної промисловості. Це дозволить підвищити продуктивність та ефективність управлінських рішень, а також мінімізувати ризики, пов'язані з постачанням сировини та змінами в замовленнях. Важливою складовою є й перспективність застосування штучного інтелекту, що зможе забезпечити підвищення точності прогнозів, зниження виробничих витрат та збільшення прибутковості підприємств. Використання створеної системи забезпечить мінімізацію людського фактору в процесі управління в умовах невизначеності.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Walstra P., Wouters J.T.M., Geurts T.J. *Dairy Science and Technology*. 2nd ed. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005. P. 782. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420028010> (date of access: 29.08.2025).
2. Bylund G. *Dairy Processing Handbook*. 2nd ed. Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB, 2003. 480 p.
3. Addanki M., Patra P., Kandra P. Recent advances and applications of artificial intelligence for promoting performances in different areas of food sectors. *Applied Food Research*. 2022. Vol. 2, N 2. P. 100126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100126> (date of access: 29.08.2025).
4. Грибков С.В., Литвинов В.В., Олійник Г.В. Задача планування виконання договорів та підходи до її ефективного вирішення. *Математичні машини і системи*. 2015. № 1. С. 61–70.
5. Hrybkov S.V., Litvinov V.V., Oliynyk H.V. Web-oriented decision support system for planning agreements execution. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2018. N 2 (93). P. 13–24.
6. Hrybkov S.V., Kharkianen O.V., Ovcharuk V.O., Ovcharuk I.V. Development of information technology for planning order fulfillment at a food enterprise. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2020. N 3 (103). P. 62–73.
7. Грибков С.В., Сєдих О.Л. Розробка модифікованих ітераційних алгоритмів для розв'язання задачі формування оптимальних варіантів розкладу виконання замовлень. *Харчова промисловість*. 2020. № 27. С. 126–137.
8. Hrybkov S.V., Breus N.M., Seidikh 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, N 5. P. 57–66. URL: <https://doi.org/10.15407/scine15.05.057> (date of access: 29.08.2025).
9. Винничук Р. Штучний інтелект у харчовій промисловості. *Grail of Science*. 2024. N 36. P. 335–343.
10. Guerrero J. IA Alimentaria: Штучний інтелект у харчовій промисловості: технологічна революція 2025 року. *AI Chef Pro*. 2025. 3 вересня. URL: <https://blog.aichef.pro/uk/ia-alimentaria-revolucion-tecnologica-en-la-industria-de-alimentos/> (date of access: 29.08.2025).
11. Taneja A., Kumari S., Gupta R., Singh P. Artificial intelligence: Implications for the agri-food sector. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, N 5. P. 1397. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051397> (date of access: 29.08.2025).
12. Науменко М., Краснюк М. Ефективне застосування генетичних алгоритмів у вирішенні багатоекстремумних оптимізаційних задач у менеджменті конкурентного підприємства. *Grail of Science*. 2024. N 41. P. 65–73.

13. Найпопулярніші бібліотеки ШІ та машинного навчання Python. *ProIT*. 2023. 18 липня. URL: <https://proit.ua/naipopuliarnishi-bibliotieki-shi-ta-mashinnogho-navchannia-python/> (дата звернення: 29.08.2025).

Стаття надійшла до редакції 11.09.2025