МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШАБАШ МИКОЛА ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 636.082:601.4:006.83:591.146

ДИСЕРТАЦІЯ

ОЦІНКА ВПЛИВУ ГЕНЕТИЧНИХ ТА ПАРАТИПОВИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ МОЛОКА

204 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва»
20 «Аграрні науки та продовольство»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____Микола ШАБАШ

Науковий керівник: доктор
сільськогосподарських наук, професор,
член кореспондент НААН України
Сергій РУБАН, завідувач кафедри прикладної
біології, розведення та генетики тварин

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Шабаш М.Л. **Оцінка впливу генетичних та паратипових факторів на якісні показники молока.** - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 204 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва» (20 «Аграрні науки та продовольство»). – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2026.

Система оцінки в програм відбору та прийняття управлінських рішень у молочному скотарстві успішно реалізується в еталонних (зразкових або референтних) популяціях тварин, які генотиповані та фенотипово оцінені за великою кількістю ознак. Постійне розширення масиву таких даних є критично важливим для селекційного процесу, оскільки забезпечує основу для точного оцінювання та прогнозування племінної цінності молодих тварин. Водночас такі дані можуть бути пов’язані з харчовою цінністю молока та ефективністю використання кормового білка коровами, що має важливе економічне значення для молочного виробництва.

В умовах господарств України формування подібних науково-експериментальних систем набуває першочергового значення, оскільки дає змогу перевіряти робочі гіпотези та оперативно приймати обґрунтовані рішення у виробничих умовах. Ефективність використання кормів у скотарстві залишається ключовим напрямом сучасних програм відбору, оскільки дозволяє зменшити витрати на виробництво продукції за рахунок оптимізації основної статті фінансових витрат, пов’язаних з економією корму. Як спрощений та доступний спосіб оцінки такої ефективності авторами прийнято робочу гіпотезу комплексного аналізу основних компонент молока до яких віднесено вміст жиру, білка, лактози, рівень сечовини молока та біохімічний аналіз крові досліджуваних тварин.

Визначено взаємозв’язки та регресійні залежності між основними компонентами молока (вмістом жиру, білка та лактози), величиною надою, живою масою корів, рівнем азоту сечовини в молоці (MUN) та показником ефективності використання азоту молока (MNE). Вивчено як основні біохімічні маркери, пов’язані з MUN і ефективністю використання азоту молока коровами, проаналізовано загальний і прямий білірубін, сечовину, креатинін, активність аланінамінотрансферази, аспартатамінотрансферази, гамма-глутамілтрансферази, вміст глюкози, альбумінів і загального білка.

На основі даних крові досліджуваних тварин встановлено зв’язки між основними біохімічними показниками та потенційними ознаками-предикторами. Оцінено рівень мінливості та характер взаємозв’язків між компонентами молока (вміст жиру, білка, лактози), величиною надою, живою масою корів, рівнями MUN і MNE. Узагальнено результати власних досліджень і світового досвіду щодо мінливості та взаємозв’язків основних компонентів молока, включаючи вміст жиру, білка, лактози, а також показники MUN і MNE. Встановлено залежність ефективності використання азоту (MNE) від генетичних і середовищних чинників. Визначено можливості використання індивідуальних і групових значень MUN та MNE у програмах оцінювання і відбору з метою підвищення молочної продуктивності, покращення складу молока та ефективності виробництва. Обґрунтовано підходи до побудови описової математичної моделі оцінки ефективності використання азоту молочними коровами з урахуванням взаємодії генотипу та середовища.

Дослідження проводилися в умовах фермерського господарства «Григорович С.А.» Київської області періоду зими 2022–2023 років на коровах комбінованої Симентальської, Української червоно-рябої та чорно-рябої молочних порід. Кожна з груп тварин у досліді налічувала по 33 голови, підібраних за принципом груп-аналогів.

Всього проаналізовано 4 продуктивні ознаки (надій за 305 днів лактації, вміст жиру та білка, кількість молока, скоригованого на енергетичну цінність — ECM), а також 10 біохімічних показників: загальний білірубін, прямий білірубін, сечовина, креатинін, аланінамінотрансфераза (АЛТ), аспартатамінотрансфераза (АСТ), гамма-глутамілтрансфераза (ГГТ), глюкоза, альбуміни, загальний білок.

Породний фактор зіграв значну роль за впливом на продуктивні ознаки — вміст жиру в молоці та енергетичну цінність молока (ECM), значення яких відповідно склали 14,6 та 51,2%. Суттєві розбіжності в показниках продуктивності між комбінованою Симентальською, Українською червоно-рябою та чорно-рябою породами зумовлені їх виробничою спрямованістю, що вплинуло на особливості травлення в цілому, зокрема травлення азоту.

Аналіз впливу генетичних (порода) та негенетичних (місяць лактації, місяць тільності) факторів довів, що вірогідний вплив фактора породи відзначено за такими біохімічними показниками крові, як рівень загального білірубіну (24,7%), сечовини (33,2%), креатиніну (49,8%), аспартатамінотрансферази (АСТ) (46,3%), альбуміну (35,1%) та загального білка (13,2%). Вплив фактора «порода» був достовірним за рахунок контрастних показників продуктивності між порівнюваними групами протягом усього періоду лактації, яка реалізовувалася в однакових умовах годівлі та здійснювалася за принципом «без обмежень».

Встановлено тісний кореляційний зв'язок між концентраціями сечовини, яка є основним азотистим кінцевим продуктом катаболізму білків і амінокислот, та креатиніном – продуктом розпаду креатинфосфату в м’язах – у корів Симентальської, Української червоно-рябої молочної та Української чорно-рябої молочної порід. Загальний коефіцієнт кореляції для сечовини плазми крові та креатиніну становить 0,552, що свідчить про позитивний зв'язок і значне підвищення рівня креатиніну в плазмі крові досліджуваних груп корів при зростанні рівня сечовини, і навпаки.

Встановлено позитивну кореляційну залежність між креатиніном та аспартатамінотрансферазою, що характеризує функціональний стан печінки, а також альбуміном у плазмі крові досліджуваних груп тварин. Загальний коефіцієнт кореляції становить 0,457 і 0,744 відповідно, з вірогідними значеннями. Загальний коефіцієнт кореляції для сечовини, альбуміну і загального білка плазми крові становить 0,454.

Таким чином, сечовина як можливий предиктор відображає взаємозв'язок з основними метаболітами крові, що може бути використано для пояснення напрямів формування та реалізації господарсько-корисних ознак.

Важливим біомаркером, який відображає ефективність білкового обміну корів, рівень споживання та якість «вхідного» протеїну, а також баланс енергії в раціоні, є азот сечовини молока (MUN). Для оцінки ефективності використання азоту при виробництві молока нами використано модель за P. Huhtanen et al. [45]. При цьому MNE розглядається як показник ефективності використання азоту, який надходить з кормом для виробництва молока.

Мета другого етапу роботи полягала у визначенні впливу генетичних (походження корів за батьком) та паратипових (рік і місяць отелення) факторів на молочну продуктивність, якісні показники молока, концентрацію азоту сечовини молока та ефективність використання азоту у корів голштинської породи. Матеріалом для досліджень слугували дані 595 корів, що утримувалися в умовах ТОВ «Агрофірма "Колос"» Київської області (Україна). Дослід проведено у стандартних умовах при годівлі корів за принципом «без обмежень» з аналізом продуктивних та біохімічних показників якості молока. Продуктивність корів знаходилася в межах 8500–8700 кг молока при кількості молочного жиру 310–320 кг.

Визначення азоту сечовини молока (MUN) здійснювалося не менше трьох разів по кожній корові за весь період лактації, що склало понад 1800 аналізів. Загальні коливання MUN становили від 2,6 до 32,9 мг/дл з відповідним поділом на

три рівні: 1) оптимальний MUN* (1-й рівень) — 8–11,99 мг/дл; 2) вище оптимального MUN* (2-й рівень) — 12–15,99 мг/дл; 3) MUN* (3-й рівень) — 16,0 мг/дл і більше. Загальні дані відображають рівень показників молока.

Прийняте ранжування груп корів за проявом MUN у певних діапазонах дало можливість визначити кращі показники рівня відтворення (міжотельний період) у групі із середнім значенням 14,7 місяці (MUN у діапазоні 8–12 мг/дл). Надлишок сечовини (12 мг/дл і більше) зумовлює критичний стан для репродукції через високий рівень аміаку в крові та сечовини в молоці і, як наслідок, змінює pH слизу матки.

Можна констатувати суттєвий вплив таких організованих факторів, як сезонні зміни годівлі в різні сезони та місяці року, а також зміни температурного режиму на фермі в різні періоди. Вплив негенетичних факторів був доволі високим за добовим надоєм, вмістом жиру, білка та лактози, а також MUN. Вплив плідника (походження за батьком) на рівень MUN у дочок невірогідний ($\eta^2 = 7,6\%$), що вказує на наявність певної тенденції такого впливу. Для оцінки генетичної компоненти цих показників необхідно використовувати не абсолютні їх значення, а характер їх змін за певний період часу в розрізі генетичних груп, пов’язуючи такі зміни з нормою реакції «генотип – середовище».

Враховуючи суттєвий вплив фактора «порода» на показник енергетичної цінності молока (ECM), нами проведено оцінку можливих змін цього показника залежно від рівнів MUN. Надлишок сечовини (при вмісті азоту сечовини в молоці 16 мг/дл і більше) вказує на надлишок азоту в рубці та можливу нестачу енергії для його засвоєння. Таким чином, енергетична цінність молока може знижуватися через меншу ефективність синтезу жиру та білка. Формально це підтверджується від’ємним коефіцієнтом кореляції (−0,1344±0,0945) між значеннями ECM та MUN. Висока сечовина та низький білок (від’ємний коефіцієнт кореляції −0,1129±0,0947)

свідчать про серйозний дефіцит енергії, що зменшує жирність та загальну поживність молока.

Для більш практичного застосування отриманих результатів нами проведено розрахунки регресійної залежності основних компонентів молока, включаючи MUN, на ефективність використання азоту молока (MNE). Коефіцієнт детермінації (r^2) розглядається як частка дисперсії MNE, яка обумовлена впливаючими ознаками (добовий надій, вміст жиру в молоці, вміст білка в молоці, вміст лактози в молоці, MUN, жива маса корови).

Суттєві зміни MNE залежали від величини добового надою ($r^2 = 0,7139$), рівня азоту сечовини молока (MUN, $r^2 = 0,2016$), енергетичної цінності молока (ECM, $r^2 = 0,6371$). Виявлена вірогідна регресійна залежність змін добового надою, рівня сечовини та енергетичної цінності молока, що дає можливість прогнозувати показник ефективності використання азоту молока (MNE).

Концентрація MUN не є достатньо інформативним інструментом фенотипування для покращення MNE, однак її вимірювання на рівні стада дозволяє більш точно коригувати раціон з метою підвищення перетравності корму або ефективності використання азоту. На наш погляд, візуалізація такої залежності дає змогу виокремити тварин із високими показниками MNE за оптимальних значень MUN у діапазоні 8–12 мг/дл.

Нами встановлено певні залежності використаної моделі, коли зі збільшенням добового надою значення MNE зростає до рівня 53 кг молока на добу, після чого стабілізується та має тенденцію до зниження.

Отримані результати можуть бути основою для рекомендації щодо включення показників MUN і MNE до систем оцінки та моніторингу продуктивності та добробуту корів. Використання отриманих регресійних залежностей дозволяє прогнозувати якісні характеристики молока, а також ефективність використання азоту корму.

Оцінка індивідуальних і групових значень MUN та показника MNE у програмах селекційного відбору сприятиме підвищенню молочної продуктивності, покращенню складу молока та зростанню ефективності виробництва.

У подальших дослідженнях доцільно проводити регулярний моніторинг рівня азоту сечовини молока у дочок плідників з метою виявлення генетичної складової впливу на ефективність використання азоту корму.

Продовження досліджень у напрямі обґрунтування моделі, що поєднує генотипові особливості корів, сезонні фактори та показники MUN, дозволяє оптимізувати селекційні програми, розширюючи аналітичну базу методів моделювання й прогнозування можливих змін.

Ключові слова: рівень сечовини в крові; азот сечовини крові; азот сечовини молока (MUN); ефективність використання азоту для виробництва молока (MNE); енергетична цінність молока; молоко, скориговане за енергією (ECM); жир; білок; лактоза; кореляційний зв’язок; регресійна залежність; молочні породи України; ступінь впливу породи; вплив факторів; феноміка.

ABSTRACT

Shabash M.L. **Assessment of the influence of genetic and paratypic factors on milk quality indicators.** - Qualification scientific work in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 204 “Technology of Production and Processing of Livestock Products” (20 “Agricultural Sciences and Food”). – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The evaluation system used in selection programs and management decision-making in dairy cattle farming is successfully implemented in reference (model or benchmark) animal populations that have been genotyped and phenotypically evaluated for a large

number of traits. The continuous expansion of this dataset is critically important for the breeding process, as it provides the basis for accurately evaluating and predicting the breeding value of young animals. At the same time, such data can be linked to the nutritional value of milk and the efficiency of feed protein utilization by cows, which is of significant economic importance for dairy production.

In the context of Ukrainian farms, the development of such scientific and experimental systems is of paramount importance, as it enables the testing of working hypotheses and the prompt adoption of informed decisions under actual production conditions. Feed efficiency in livestock farming remains a key focus of modern selection programs, as it allows for reducing production costs by optimizing the main component of financial expenses related to feed savings. As a simplified and accessible method for assessing such efficiency, the authors adopted a working hypothesis of a comprehensive analysis of the main components of milk, which includes fat, protein, and lactose content, milk urea levels, and biochemical blood analysis of the studied animals.

Correlations and regression relationships were determined between the main milk components (fat, protein, and lactose content), milk yield, cow body weight, milk urea nitrogen (MUN) levels, and the milk nitrogen efficiency (MNE) index. The main biochemical markers associated with MUN and milk nitrogen utilization efficiency in cows were studied, and total and direct bilirubin, urea, creatinine, and the activity of alanine aminotransferase, aspartate aminotransferase, gamma-glutamyltransferase, glucose, albumin, and total protein levels.

Based on blood data from the study animals, correlations were established between key biochemical parameters and potential predictive markers. The degree of variability and the nature of the relationships between milk components (fat, protein, and lactose content), milk yield, cow body weight, and MUN and MNE levels were assessed. The results of our own research and global experience regarding the variability and relationships of key milk components, including fat, protein, and lactose content, as well as MUN and MNE values,

were summarized. The dependence of nitrogen utilization efficiency (MNE) on genetic and environmental factors was established. The potential for using individual and group MUN and MNE values in evaluation and selection programs to increase milk productivity, improve milk composition, and enhance production efficiency has been identified. Approaches to constructing a descriptive mathematical model for evaluating nitrogen utilization efficiency in dairy cows, taking into account the interaction between genotype and environment, have been substantiated.

The study was conducted at the «S.A. Grygorovych» farm in the Kyiv region during the winter of 2022–2023 on cows of the Simmental, Ukrainian Red-and-White, and Black-and-White dairy breeds. Each group of animals in the experiment consisted of 33 head, selected according to the principle of control groups.

A total of 4 production traits were analyzed (milk yield over 305 days of lactation, fat and protein content, and energy-corrected milk (ECM)), as well as 10 biochemical parameters: total bilirubin, direct bilirubin, urea, creatinine, alanine aminotransferase (ALT), aspartate aminotransferase (AST), gamma-glutamyltransferase (GGT), glucose, albumin, and total protein.

The breed factor played a significant role in influencing production traits – milk fat content and milk energy value (ECM) – accounting for 14.6% and 51.2% of the variance, respectively. Significant differences in productivity indicators between the crossbred Simmental, Ukrainian Red-and-White, and Black-and-White breeds are due to their production orientation, which influenced overall digestive characteristics, particularly nitrogen digestion.

An analysis of the influence of genetic (breed) and non-genetic (month of lactation, month of gestation) factors showed that a significant effect of breed was observed for the following blood biochemical parameters: total bilirubin (24.7%), urea (33.2%), creatinine (49.8%), aspartate aminotransferase (AST) (46.3%), albumin (35.1%), and total protein (13.2%). The effect of the «breed» factor was significant due to contrasting productivity

indicators between the compared groups throughout the entire lactation period, which was conducted under identical feeding conditions and carried out on an «ad libitum» basis.

A strong correlation has been established between the concentrations of urea – the primary nitrogenous end product of protein and amino acid catabolism – and creatinine – a breakdown product of creatine phosphate in muscles – in cows of the Simmental, Ukrainian Red-and-White Dairy, and Ukrainian Black-and-White Dairy breeds. The overall correlation coefficient for plasma urea and creatinine is 0.552, indicating a positive correlation and a significant increase in plasma creatinine levels in the studied groups of cows as urea levels rise, and vice versa.

A positive correlation was found between creatinine and aspartate aminotransferase – which characterizes liver function – as well as plasma albumin in the study groups of animals. The overall correlation coefficients were 0.457 and 0.744, respectively, with statistically significant values. The overall correlation coefficient for urea, albumin, and total plasma protein is 0.454.

Thus, urea, as a potential predictor, reflects a relationship with key blood metabolites, which can be used to explain the mechanisms underlying the formation and expression of economically valuable traits.

Milk urea nitrogen (MUN) is an important biomarker that reflects the efficiency of protein metabolism in cows, the level of intake and quality of “incoming” protein, as well as the energy balance in the diet. To assess nitrogen utilization efficiency in milk production, we used the model by P. Huhtanen et al. [45]. In this model, MNE is considered an indicator of the efficiency of nitrogen utilization derived from feed for milk production.

The objective of the second phase of the study was to determine the influence of genetic (cows’ paternal lineage) and parity-related (year and month of calving) factors on milk yield, milk quality parameters, milk urea nitrogen concentration, and nitrogen utilization efficiency in Holstein cows. The research data were based on 595 cows kept at

Agrofirma «Kolos» LLC in the Kyiv region (Ukraine). The study was conducted under standard conditions with «ad libitum» feeding of the cows, including analysis of milk production and biochemical quality indicators. The cows' productivity ranged from 8,500 to 8,700 kg of milk with a milk fat content of 310–320 kg.

Milk urea nitrogen (MUN) was measured at least three times for each cow throughout the entire lactation period, totaling more than 1,800 tests. Overall MUN values ranged from 2.6 to 32.9 mg/dL, with the following three categories: 1) optimal MUN* (Level 1) — 8–11.99 mg/dL; 2) above optimal MUN* (Level 2) — 12–15.99 mg/dL; 3) MUN* (Level 3) — 16.0 mg/dL and above. The overall data reflect the level of milk quality indicators.

The established ranking of cow groups based on MUN levels within specific ranges made it possible to identify the best reproductive performance (intercalving interval) in the group with a mean of 14.7 months (MUN in the range of 8–12 mg/dL). Excess urea (12 mg/dL or more) causes a critical condition for reproduction due to high levels of ammonia in the blood and urea in the milk, and, as a result, alters the pH of the uterine mucus.

It can be concluded that organized factors such as seasonal changes in feeding during different seasons and months of the year, as well as changes in the temperature regime on the farm during different periods, have a significant impact. The influence of non-genetic factors was quite high on daily milk yield, fat, protein, and lactose content, as well as MUN. The influence of the sire (paternal origin) on MUN levels in daughters is not significant ($\eta^2 = 7.6\%$), indicating the presence of a certain trend of such influence. To assess the genetic component of these indicators, it is necessary to use not their absolute values, but the nature of their changes over a specific period of time across genetic groups, linking such changes to the "genotype–environment" interaction.

Given the significant influence of the «breed» factor on the energy content of milk (ECM), we assessed possible changes in this indicator depending on MUN levels. Excess urea (with a urea nitrogen content in milk of 16 mg/dL or higher) indicates excess nitrogen

in the rumen and a possible energy deficiency for its assimilation. Thus, the energy content of milk may decrease due to reduced efficiency of fat and protein synthesis. This is formally confirmed by a negative correlation coefficient (−0.1344±0.0945) between ECM and MUN values. High urea and low protein (negative correlation coefficient −0.1129±0.0947) indicate a serious energy deficit, which reduces the fat content and overall nutritional value of milk.

To facilitate the practical application of these results, we calculated the regression relationship between the main milk components, including MUN, and milk nitrogen efficiency (MNE). The coefficient of determination (r^2) is considered as the proportion of MNE variance attributable to the influencing factors (daily milk yield, milk fat content, milk protein content, milk lactose content, MUN, and cow live weight).

Significant changes in MNE depended on daily milk yield ($r^2 = 0.7139$), milk urea nitrogen (MUN, $r^2 = 0.2016$), and milk energy content (ECM, $r^2 = 0.6371$). A significant regression relationship was found between changes in daily milk yield, urea levels, and milk energy content, which makes it possible to predict the milk nitrogen efficiency (MNE) index.

MUN concentration is not a sufficiently informative phenotyping tool for improving MNE; however, measuring it at the herd level allows for more precise dietary adjustments aimed at improving feed digestibility or nitrogen utilization efficiency. In our view, visualizing this relationship allows us to identify animals with high MNE values at optimal MUN levels in the range of 8–12 mg/dL.

We have identified certain dependencies of the model used, where as daily milk yield increases, the MNE value rises to 53 kg of milk per day, after which it stabilizes and tends to decrease.

The results obtained can serve as a basis for recommending the inclusion of MUN and MNE indices in systems for evaluating and monitoring cow productivity and welfare.

The use of the regression relationships obtained allows for the prediction of milk quality characteristics as well as the efficiency of feed nitrogen utilization.

Evaluating individual and group values of MUN and the MNE index in breeding programs will contribute to increased milk production, improved milk composition, and enhanced production efficiency.

In future studies, it is advisable to conduct regular monitoring of milk urea nitrogen levels in the daughters of sires to identify the genetic component influencing feed nitrogen utilization efficiency.

Further research aimed at validating a model that integrates cows' genotypic characteristics, seasonal factors, and MUN indicators enables the optimization of breeding programs by expanding the analytical basis for modeling and forecasting potential changes.

Keywords: blood urea level; blood urea nitrogen; milk urea nitrogen (MUN); milk nitrogen efficiency (MNE); milk energy value; energy-corrected milk (ECM); fat; protein; lactose; correlation; regression relationship; dairy breeds of Ukraine; degree of breed influence; influence of factors; phenomics.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus:

1. Ruban S., **Shabash M.,** Tupitska O., Slobodyanyuk N. Effect of breed factor on urea level and blood biochemical parameters in dairy cattle // Animal Science and Food Technology. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 9–25. https://doi.org/10.31548/animal.1.2025.09 .

(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; виконано біохімічні аналізи; здійснено математичну обробку отриманих даних; визначено актуальність, сформульовано наукову новизну, практичне значення та мету

проведених досліджень, узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, підготовлено публікацію до друку відповідно до вимог видання; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження; Тупицька О.М.: забезпечення науково-методичного супроводу біохімічних досліджень; Слободянюк Н.М.: проведено літературний науковий пошук, порівняльний аналіз наявних досліджень, які наближені до опублікованих авторами та визначено відповідні узгодження і відмінності).

2. Ruban S., **Shabash M.,** Tupitska O., Danshin V., Slobodyanyuk N. Variability of milk urea nitrogen traits and their potential use in dairy cattle // Animal Science and Food Technology. 2025. Vol. 16, No. 3. P. 37–53. https://doi.org/10.31548/animal.3.2025.37.

(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; визначено актуальність, сформульовано наукову новизну, практичне значення та мету проведених досліджень, узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, підготовлено публікацію до друку відповідно до вимог видання; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження; Тупицька О.М.: забезпечення науково-методичного супроводу досліджень показників якості молока; проведено аналіз і узагальнення сучасних наукових джерел; Даншин В.О.: здійснено

статистичну обробку експериментальних даних; Слободянюк Н.М.: проведено літературний науковий пошук, порівняльний аналіз наявних досліджень, які наближені до опублікованих авторами та визначено відповідні узгодження і відмінності).

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Ruban S. Y., **Shabash M. L.** Assessment of the efficiency of feed protein use in dairy cattle based on the indicators of fat, protein, lactose and urea nitrogen in milk // Науково-технічний бюлетень Інституту тваринництва НААН. Харків, 2025. № 135. С. 133–145. https://doi.org/10.32900/2312-8402-2025-135-132-144.

(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; , визначено актуальність, сформульовано наукову новизну, практичне значення та мету проведених досліджень, узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук, порівняльний аналіз наявних досліджень, які наближені до опублікованих авторами та визначено відповідні узгодження і відмінності, підготовлено публікацію до друку відповідно до вимог видання; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження).

4. Рубан С. Ю., **Шабаш М. Л.** Моделювання впливу змін продуктивних показників у молочних корів на ефективність використання азоту корму // Біологія тварин. Львів, 2025. Т. 27, № 3. С. 68–76 https://doi.org/10.15407/animbiol27.03.068.

(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; **,** *визначено актуальність, сформульовано наукову новизну, практичне значення та мету проведених досліджень, узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук, порівняльний аналіз наявних досліджень, які наближені до опублікованих авторами та визначено відповідні узгодження і відмінності, підготовлено публікацію до друку відповідно до вимог видання; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження*).

5. Рубан С. Ю., **Шабаш М. Л.** Розширення можливостей феноміки в програмах відбору молочної худоби // Розведення і генетика тварин. Київ, 2026. Вип. 71. С. 160–171. https://doi.org/10.31073/abg.71.15.

(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; **,** *визначено актуальність, сформульовано наукову новизну, практичне значення та мету проведених досліджень, узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук, порівняльний аналіз наявних досліджень, які наближені до опублікованих авторами та визначено відповідні узгодження і відмінності, підготовлено публікацію до друку відповідно до вимог видання; Рубан*

С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження).

6. Рубан С. Ю., **Шабаш М. Л.,** Тупицька О. М. Розширення можливостей моделі прогнозування ефективності використання азоту молочними коровами на основі взаємодії генотипу та середовища // Ветеринарія, технології тваринництва та природокористування. Харків, 2026. Вип.13. С. 74-87.

(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; визначено актуальність, сформульовано наукову новизну, практичне значення та мету проведених досліджень, узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, підготовлено публікацію до друку відповідно до вимог видання; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження; Тупицька О.М.: забезпечення науково-методичного супроводу досліджень показників якості молока; проведено аналіз і узагальнення сучасних наукових джерел.

Тези наукових доповідей:

1. Шабаш М. Л. Молекулярно-генетичні та біохімічні методи як інструмент у дослідженні біологічних об'єктів різного рівня організації // Еколого-регіональні проблеми сучасного тваринництва та ветеринарної медицини : матеріали IX щорічної Всеукраїнської науково-практичної конференції, 17 листопада 2022 р., Житомир. Житомир: Поліський національний університет, 2022. С. 343–345.

2. Shabash M. Molecular markers // Perspectives of contemporary science: theory and practice: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, 26–28 May 2024, Lviv, Ukraine. Lviv, 2024. P. 34–35.

3. Shabash M. Biochemical parameters of blood serum of cows of different breeds dairy productivity area // One World – One Health: Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference, 4–5 June 2024, Słupsk, Poland. Słupsk, 2024. P. 278–279.

4. Шабаш М. Л., Рубан С. Ю. Вплив генетичних та паратипових чинників на показники якості молока та рівень азоту сечовини у корів // Актуальні проблеми ветеринарної патології: матеріали міжнародної наукової конференції, 2–3 жовтня 2025 р., Київ. Київ: НУБіП України, 2025. С. 104–105. *(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження).*

5. Шабаш М. Л., Рубан С. Ю. Вплив кормового білка та сезонних факторів на ефективність використання азоту і якісний склад молока у корів голштинської породи // Інноваційні аспекти та перспективи розвитку технології виробництва і переробки продукції тваринництва: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 24–25 жовтня 2025 р., Миколаїв. Миколаїв, 2025. С. 59–61. *(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання*

показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження).

6. Шабаш М. Л., Рубан С. Ю. Вплив змін продуктивних показників у молочних корів на величину ефективності використання азоту корму // Зміни клімату та її наслідки для тваринництва і ветеринарної медицини: наукові підходи та інноваційні рішення: матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції, 23–24 жовтня 2025 р., Кам'янець-Подільський. Кам'янець-Подільський, 2025. С. 227–229. *(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження)*

7. Shabash M. L., Ruban S. Y. Biochemical parameters of blood of cows of different breeds // Сучасні технології у тваринництві та виробництві: навколишнє середовище, виробництво продукції, екологічні проблеми : збірник наукових праць 79-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 25 квітня 2025 р., Київ. Київ: НУБіП України, 2025. С. 38–39. *(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального*

матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження)

8. Шабаш М. Л., Рубан С. Ю. Вплив породного фактора на рівень сечовини крові корів різних порід // Наукові і технологічні виклики тваринництва у XXI столітті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 95-річчю від дня народження акад. Г. О. Богданова, 6–7 березня 2025 р., Київ. Київ : НУБіП України, 2025. С. – 87–88. *(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження)*

9. Shabash M. L., Ruban S. Y. Correlation dependence between urea concentration and biochemical indicators of blood of different breeds // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції науковців, викладачів та аспірантів, 22–23 квітня 2025 р., Харків. Харків, 2025. С. 164–165. *(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з*

використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження)

10. Рубан С. Ю., Шабаш М. Л. Оцінка ефективності використання азоту молочними коровами за вмістом азоту сечовини та складом молока // Генетика і селекція – ключові аспекти сталого розвитку у сфері виробництва і переробки продукції тваринництва: матеріали Всеукраїнської конференції, 18 лютого 2026 р., Біла Церква. Біла Церква, 2026. С. –. 147-150. *(Шабаш М.Л.: здійснено огляд наукової літератури за темою дослідження; проведено збір та систематизацію експериментального матеріалу; проведено вимірювання показників якості молока з використанням стандартизованих інструментальних методів; здійснено математичну обробку отриманих даних; узагальнено та інтерпретовано результати експериментальних досліджень, узгоджено з рештою співавторів висновки, проведено літературний науковий пошук; Рубан С.Ю.: здійснено загальне методичне керівництво роботою; розроблено робочу гіпотезу дослідження; обґрунтовано та сформовано модель оцінки досліджуваних показників; розроблено методику виконання дослідження)*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ…….. 25

ВСТУП…….. 27

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ…….. 33

1.1. Основи обміну сечовини та азоту у великої рогатої худоби…… 33

1.1.1. Біологічна роль сечовини та її діагностичне значення……... 33

1.1.2. Роль мікробіоти рубця у метаболізмі сечовини та використанні азоту..... 40

1.1.3. Сечовина як індикатор збалансованості годівлі та ефективності азотного обміну…….....… 44

1.2. Показники сечовини та їх зв’язок із продуктивністю і здоров’ям корів…. 48

1.2.1. Взаємозв’язок BUN, MUN та UUN з продуктивними та фізіологічними показниками……..... 48

1.2.2. Вплив рівня сечовини на здоров’я та відтворну здатність……. 55

1.2.3. Практичне використання показників сечовини в управлінні молочними стадами……..... 59

1.3. Генетичні, екологічні та селекційні аспекти азотного обміну……. 62

1.3.1. Генетичні та селекційні аспекти рівня сечовини…… 62

1.3.2. Екологічні аспекти азотного обміну…… 65

1. 4. Сучасні методи оцінки рівня сечовини та прогнозування ефективності азотного обміну…… 68

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ…….. 72

2.1. Схема проведення досліджень……. 72

2.2. Умови та методика проведення першої серії досліджень……. 72

2.3. Умови та методика проведення другої серії досліджень…….. 76

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВЛАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ…… 82

3.1. Вплив породного фактору на рівень сечовини та біохімічні показники крові в молочному скотарстві……. 82

3.2. Аналіз впливу генетичних та паратипових факторів на продуктивні й біохімічні показники молока…….. 91

3.3. Економічна ефективність результатів досліджень…… 121

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ… 126

ВИСНОВКИ…….. 135

ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ……. 138

СПИСОК ЛІТУРАТУРИ……. 139

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

ADF (Acid detergent fiber) – кислотно-детергентна клітковина

BHB (β-hydroxybutyrate) – β-гідроксибутират

BUN (Blood Urea Nitrogen) – азот сечовини крові

CP (Crude protein) – сирий протеїн

EC (Efficient cows) – «ефективні корови»

ECM (Energy-corrected milk) – енергетично-скоригований надій

GWAS (Genome-Wide Association Study) – повногеномні асоціативні дослідження

IOFC (Income Over Feed Cost) – економічний показник, який відображає різницю між доходом від реалізації молока та витратами на корми для лактуючих корів

MIR (Mid-Infrared) – середньоінфрачервоний

MNE (Milk nitrogen efficiency) – ефективність використання азоту молока

MUN (Milk Urea Nitrogen) – азот сечовини молока

NDF (Neutral detergent fiber) – нейтрально-детергентна клітковина

NEB (Negative Energy Balance) – негативний енергетичний баланс

NEFA (Non-esterified fatty acids) – неестерифіковані жирні кислоти

NFC (Non-fibrous carbohydrates) – неструктурні вуглеводи

NFC/CP – співвідношення неклітинних вуглеводів (NFC) до сирого протеїну (CP)

NPN (Non-Protein Nitrogen) – небілковий азот

pH – показник кислотності середовища

RDP (Rumen Degradable Protein) – розщеплюваний у рубці протеїн

RUP (Rumen Undegradable Protein) – нерозщеплюваний у рубці протеїн

THI (Temperature–Humidity Index) – індекс температури та вологості

TMR (Total Mixed Ration) – загальнозмішаний раціон

UUN (Urinary Urea Nitrogen) – азот сечовини сечі

АЛТ, ALT *(*Alanine Aminotransferase) – аланінамінотрансфераза

АСТ, AST (Aspartate Aminotransferase) – аспартатамінотрансфераза

ГГТ, GGT (Gamma-Glutamyl Transferase) – гамма-глутамілтрансфераза

СЗМЗ – сухий знежирений молочний залишок

ВСТУП

Актуальність теми. Методологія сучасних програм відбору та прийняття управлінських рішень у молочному скотарстві успішно реалізується в референтних популяціях тварин, які генотиповані та фенотиповані за великою кількістю ознак. Постійне розширення набору даних є критично важливим для селекції, оскільки забезпечує основу для точного оцінювання та прогнозування племінної цінності молодих тварин. Водночас такі дані можуть бути пов’язані з харчовою цінністю молока (медичний аспект) та ефективністю використання кормового білка коровами, що є важливою економічною складовою молочного виробництва.

В умовах господарств України формування таких науково-експериментальних систем має першочергове значення, оскільки дозволяє перевіряти робочі гіпотези та в подальшому оперативно приймати обґрунтовані рішення у виробничих ситуаціях. Ефективність використання кормів у скотарстві залишається на найближчу перспективу основним трендом у програмах відбору, оскільки дає можливість здешевити виробництво продукції за рахунок зменшення основної статті витрат, пов’язаних із кормами.

У рубці корів рівень азоту (N) забезпечує відповідний рівень і склад молочної продукції, впливаючи на стан здоров’я тварин та величину втрат азоту в навколишнє середовище. Будучи основним компонентом амінокислот, баланс яких у рубці впливає на синтез мікробного білка, азот залишається важливим фактором ефективного перетравлення корму та його використання мікробіотою організму.

Зв’язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідної теми, яка виконувалась на кафедрі прикладної біології, розведення та генетики тварин: «Підвищення продуктивності тварин за використання селекційно-генетичних методів», № держреєстрації 0122U200463 (2024 – 2026 рр.).

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – визначення взаємозв'язків і регресійних залежностей між основними компонентами молока (вмістом жиру, білка та лактози), величиною надою, живою масою корів, рівнем азоту сечовини в молоці (MUN) та показником ефективності використання азоту молока (MNE). Як основні біохімічні маркери, пов'язані з MUN та ефективністю використання азоту молока коровами (MNE), було вивчено: загальний і прямий білірубін, сечовину, креатинін, аланінамінотрансферазу (АЛТ), аспартатамінотрансферазу (АСТ), гамма-глутамілтрансферазу (ГГТ), глюкозу, альбуміни та загальний білок. Оцінка впливу на зазначені показники генетичних (порода, плідник або походження корови за батьком) і негенетичних (місяць, сезон або рік отелення) факторів дає змогу більш детально підвищити ефективність молочного скотарства на основі цілеспрямованого відбору кращих тварин або вдосконалення умов утримання та годівлі.

Для досягнення поставленої мети було передбачено вирішення таких завдань:

– за даними крові досліджуваних тварин определити зв'язок між основними біохімічними показниками та можливими ознаками-предикторами (predictor-змінна яка дозволяє передбачити певний результат);

– визначити рівень мінливості та взаємозв'язок між основними компонентами молока (вміст жиру, білка, лактози), величиною надою, живою масою корів, рівнем MUN та MNE (від англ. milk nitrogen efficiency-ефективність азоту молока);

– на основі власних досліджень та світового досвіду провести узагалнений аналіз мінливості та взаємозвязку основних компонент молока – вмісту жиру, білка, рівня лактози, MUN та MNE;

– встановити залежність рівня ефективності використання азоту (MNE) від генетичних та середовищних чинників;

– визначити можливості використання індивідуальних або групових значення MUN та MNE у програмах оцінювання та відбору з метою підвищення молочної продуктивності, покращення складу молока та ефективності виробництва;

– дати рекомендації, щодо описової математичної моделі оцінки ефективності використання азоту молочними коровами на основі взаємодії генотипу та середовища.

Об'єкт досліджень – діяльність (процес) у сфері розведення й менеджменту щодо підвищення ефективності галузі молочного скотарства.

Педмет досліджень – обґрунтування надійних предикторів основних компонентів молока та ознак відтворення.

Методи досліджень – факторіальні методи (оцінка впливу паратипових факторів), біохімічні (біохімічні показники сироватки крові корів і молока), зоотехнічні (показники продуктивності корів) та статистичні (статистична обробка результатів досліджень).

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше у роботі обґрунтовано підходи до використання компонентів молока не лише як показників якості та харчової цінності, а й як предикторів стану здоров’я, рівня відтворення, ефективності годівлі та екологічного навантаження.

Доведено, що азот сечовини молока (MUN) є надійним індикатором білкового обміну у молочних корів та може використовуватися для управління ефективністю виробництва в системах розведення і менеджменту.

Встановлено суттєвий вплив породного фактора на показники продуктивності, зокрема вміст жиру та енергетичну цінність молока, а також на біохімічні показники крові, що свідчить про можливість їх використання як індикаторів фізіологічного стану тварин і ефективності використання азоту.

Виявлено відсутність достовірного впливу генетичної компоненти (походження за батьком) на рівень MUN, що обґрунтовує доцільність оцінки цих показників у динаміці з урахуванням взаємодії «генотип – середовище».

Встановлено закономірності змін енергетичної цінності молока залежно від рівня MUN, що відображають взаємозв'язок білкового та енергетичного обміну у корів.

Обґрунтовано регресійні залежності між показниками продуктивності, складом молока та ефективністю використання азоту (MNE), що дозволяє прогнозувати ефективність використання азоту у процесі виробництва молока.

Встановлено, що ефективність використання азоту зростає зі збільшенням продуктивності до певного рівня, після чого стабілізується та знижується, що пов'язано з особливостями білкового та енергетичного забезпечення високопродуктивних корів.

Визначено оптимальний діапазон значень MUN, за якого забезпечуються найкращі показники відтворення, що підтверджує його значення як інтегрального показника метаболічного стану тварин.

Виділено групу «ефективних корів», які характеризуються високим рівнем використання азоту за оптимальних значень MUN, що має важливе значення для селекційних програм і підвищення ефективності виробництва.

Практичне значення отриманих результатів. Рекомендувати включення показників MUN і MNE до системи оцінки та моніторингу продуктивності та добробуту корів.

Використовувати отримані регресійні залежності для прогнозування якісних характеристики молока, а також ефективності використання азоту корму.

Оцінювати індивідуальні або групові значення MUN та показник MNE у програмах селекційного відбору з метою підвищення молочної продуктивності, покращення складу молока та зростання ефективності виробництва

В подальших дослідженнях доцільно проводити регулярний моніторинг змін рівня азоту сечовини молока у дочок плідників для виявлення генетичної компоненти впливу на ефективність використання азоту корму.

Продовжити роботу по обгрунтуванню моделі, що поєднує генотипові особливості корів (за походженням), сезонні фактори та показники MUN для оптимізації селекційних програм, що дасть змогу розширити набір аналітичних даних, а в поєднанні з методами оптимізації та моделювання вплинути на ефективність таких програм управління.

Особистий внесок здобувача. Здобувач приймав участь у організації та виконанні експериментальних досліджень з визначення впливу генетичних та паратипових факторів на якісні показники молока. Аналіз і обговорення результатів досліджень, формулювання висновків і пропозицій виробництву, а також підготовка матеріалів до публікації у наукових виданнях зроблені разом з науковим керівником.

Апробація матеріалів дисертації: IX щорічна Всеукраїнська науково-практична конференція «Еколого-регіональні проблеми сучасного тваринництва та ветеринарної медицини», Житомир, Поліський національний університет, 17 листопада 2022 року; IV International Scientific and Practical Conference «Perspectives of contemporary science: theory and practice», Ukraine, Lviv, 26–28 May 2024; I International Scientific and Practical Conference «One World – One Health», Poland. Słupsk, 4–5 June 2024; Міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми ветеринарної патології», Київ, НУБіП України, 2–3 жовтня 2025 року; Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні аспекти та перспективи розвитку технології виробництва і переробки продукції тваринництва», Миколаїв, 24–25 жовтня, 2025 року; II Міжнародна науково-практична конференція «Зміни клімату та її наслідки для тваринництва і ветеринарної медицини: наукові підходи та інноваційні рішення», Кам’янець-Подільський, 23–24 жовтня 2025 року; 79-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології у тваринництві та

виробництві: навколишнє середовище, виробництво продукції, екологічні проблеми», Київ, НУБіП України, 25 квітня 2025 року; Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 95-річчю від дня народження акад. Г. О. Богданова «Наукові і технологічні виклики тваринництва у XXI столітті», Київ, НУБіП України, 6–7 березня 2025 року; Всеукраїнська науково-практична конференція науковців, викладачів та аспірантів, Харків, 22–23 квітня 2025 року; Всеукраїнська конференція «Генетика і селекція – ключові аспекти сталого розвитку у сфері виробництва і переробки продукції тваринництва», Біла Церква, 18 лютого 2026 року.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць з яких 2 статті – у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus, 4 стаття опубліковані у фахових виданнях України та 10 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, огляду літератури, матеріалів та методів дослідження, результатів власних досліджень, аналізу та узагальнення результатів досліджень, висновків і пропозицій виробництву, списку літератури. Загальний обсяг дисертації викладено на 156 сторінках, робота ілюстрована 20 таблицями й 14 рисунками. Список використаної літератури нараховує 142 джерела, з них 139 латиницею.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Основи обміну сечовини та азоту у великої рогатої худоби

1.1.1. Біологічна роль сечовини та її діагностичне значення

Сечовина (або карбамід – $CO(NH_2)_2$, діамід вуглецевої кислоти) є кінцевим продуктом азотистого обміну в організмі жуйних тварин і відіграє ключову роль у підтриманні азотного гомеостазу великої рогатої худоби. У сучасній фізіології жуйних тварин сечовина розглядається як важливий компонент інтегрованої системи регуляції азотного обміну, що забезпечує стабільність внутрішнього середовища організму за умов змін у рівні протеїнового живлення. Доведено, що механізми синтезу та транспорту сечовини є динамічними процесами, які адаптуються до змін у складі раціону, інтенсивності лактації та енергетичного забезпечення організму. Завдяки цим механізмам жуйні тварини здатні підтримувати відносно стабільний рівень азотного гомеостазу навіть за значних коливань надходження кормового протеїну [68, 99].

В умовах інтенсивного молочного скотарства, що характеризується високою продуктивністю корів та підвищеним навантаженням на обмін речовин, процеси утворення, рециклінгу та екскреції сечовини мають вирішальне значення для здоров’я тварин, їх відтворної здатності та економічної ефективності виробництва молока [42]. Середнє значення білка в молоці коливається від 3,0 до 3,9 % за концентрації сечовини 8–25 мг/ дл [103]. Будь-які відхилення вмісту сечовини свідчать про вуглеводно-білковий дисбаланс раціону, що впливає на порушення відтворювальної функції, проблеми з ратицями, зниження ефективності використання корму тощо. Основним джерелом утворення сечовини є печінка, де вона синтезується в орнітиновому циклі як результат детоксикації аміаку, що утворюється внаслідок мікробіального розщеплення протеїнів та небілкового азоту в рубці [42, 67]. Активність орнітинового циклу в печінці залежить від інтенсивності утворення аміаку в рубці та швидкості його транспорту з кров’ю до печінкової

тканини. Встановлено, що підвищення концентрації аміаку стимулює синтез ферментів орнітинового циклу (печінковий процес перетворення токсичного аміаку на сечовину, який забезпечують 5 основних ферментів: карбамоїлфосфатсинтетаза I, орнітинкарбамоїлтрансфераза, аргініносукцинатсинтетаза, аргініносукцинатліаза та аргіназа, які діють у мітохондріях та цитозолі, знешкоджуючи азотисті), що дозволяє ефективно детоксикувати токсичні сполуки та запобігати розвитку гіперамоніємії. При цьому ефективність печінкової детоксикації є одним із ключових факторів підтримання продуктивності та метаболічного здоров'я молочних корів [47, 71].

У рубцевому відділі жуйних відбуваються складні процеси, пов'язані з утворенням мікробіального азоту та нуклеїнових кислот, циркуляцією токсичних сполук і їх подальшою нейтралізацією з утворенням сечовини [104]. Функціонування рубця як ферментаційної камери визначається взаємодією численних мікробних популяцій, які забезпечують розщеплення білкових і небілкових азотистих сполук. Дослідження метагеноміки рубцевої мікробіоти показали, що ефективність утворення мікробного білка залежить від різноманітності бактеріальних популяцій та їх ферментативної активності. Порушення мікробної рівноваги може призводити до неефективного використання азоту та підвищеного утворення сечовини [86, 130].

Особливістю жуйних тварин є інтенсивне утворення аміаку в рубці, зумовлене активною діяльністю симбіотичної мікрофлори передшлунків. За умов оптимального забезпечення енергією значна частина аміаку асимілюється мікроорганізмами для синтезу мікробного білка, який є основним джерелом амінокислот для тварини [46]. Проте при надлишковому надходженні сирого протеїну або дефіциті легкоперетравних вуглеводів аміак не повністю використовується мікрофлорою, всмоктується в кров і надходить до печінки, де перетворюється на сечовину. У високопродуктивних молочних корів інтенсивність цього процесу значно зростає, що зумовлює підвищення концентрації сечовини в біологічних рідинах і робить її

чутливим біохімічним індикатором співвідношення між надходженням протеїну та енергетичним забезпеченням раціону [46, 138].

Важливою адаптаційною перевагою жуйних тварин є здатність до рециклінгу сечовини. Рециклінг сечовини забезпечує повторне використання азоту та відіграє ключову роль у підтриманні стабільності мікробного синтезу білка в рубці. Доведено, що інтенсивність цього процесу може змінюватися залежно від рівня споживання корму (в перерахунку на суху речовину), складу корму та фізіологічного стану тварин. У корів з високою молочною продуктивністю швидкість рециклінгу (recycling- процес вторинної переробки) сечовини часто підвищується, що сприяє ефективнішому використанню кормового азоту [68, 77]. Значна частина синтезованої в печінці сечовини не виводиться з організму, а повертається до рубця через слину або шляхом дифузії через епітелій передшлунків [67]. У рубці вона гідролізується на вуглекислий газ і аміак під дією ферменту уреази, активність якої підвищує pH середовища внаслідок утворення аміаку. який повторно використовується мікроорганізмами для синтезу мікробного білка [104]. Інтенсивність рециклінгу сечовини залежить від рівня споживання сухої речовини корму, активності уреолітичної мікрофлори, pH рубцевого середовища та швидкості пасажу (від фр. passage – прохід) кормових мас [21, 67]. За оптимальних умов рециклінг сечовини сприяє підвищенню коефіцієнта використання азоту кормів та зменшенню його втрат з організму через сечу та фекалії, що знижує навантаження на довкілля та підвищує ефективність білкового обміну в організмі тварин. Водночас порушення синхронності надходження азоту та енергії в рубець призводить до надмірних коливань утворення аміаку і, відповідно, до підвищеного синтезу сечовини в печінці та зростання її екскреції з сечею. Це негативно позначається як на економічній ефективності годівлі (втрати кормового азоту), так і на екологічному навантаженні, пов’язаному з викидами таких азотовмісних сполук як метан (CH_4), вуглекислий газ (CO_2), а також в меншій кількості аміак у навколишнє середовище [42].

Для кількісної оцінки азотного обміну у великої рогатої худоби у наукових дослідженнях і практиці молочного скотарства використовують визначення концентрації азоту сечовини в крові – BUN (від англ. Blood Urea Nitrogen), молоці – MUN (від англ. Milk Urea Nitrogen,) та сечі – UUN (від англ. Urinary Urea Nitrogen). Використання цих показників дозволяє оцінювати не лише стан білкового обміну, але й ефективність перетравлення поживних речовин у різних фізіологічних групах корів. Показано, що співвідношення між цими показниками може використовуватися для прогнозування втрат азоту та оцінки кормової ефективності, що має важливе значення для оптимізації раціонів молочної худоби [64, 88]. Показник BUN безпосередньо відображає рівень сечовини в системному кровотоці та є чутливим до змін у раціоні, функціонального стану печінки та нирок [105]. Показник MUN набув більшого поширення в молочному скотарстві завдяки простоті відбору проб і можливості масового контролю в умовах промислових ферм. Концентрація MUN розглядається як інтегральний індикатор, що відображає збалансованість раціону за протеїном та енергією, а також ефективність використання азоту мікроорганізмами рубця. За даними більшості сучасних досліджень, оптимальні значення MUN для молочних корів коливаються в межах 8–25 мг/дл молока [103]. Стійке перевищення цього діапазону, як правило, свідчить про надлишкове надходження сирого протеїну або дефіцит доступної енергії в раціоні, що супроводжується зростанням синтезу сечовини та підвищеним виведенням азоту з організму. В свою чергу, низькі значення MUN можуть вказувати на недостатнє білкове забезпечення або порушення функціонального стану печінки [76, 138]. Багато досліджень показали, що надходження рослинного білка та енергії, а також їх синхронізована взаємодія в рубці є основними факторами, що впливають на концентрацію MUN.

Підвищений рівень сечовини в крові та молоці асоціюється не лише з дисбалансом поживних речовин (нутриєнтів), але як наслідок погіршенням стану здоров’я та відтворної функції корів. Порушення азотистого обміну може

супроводжуватися розвитком оксидативного стресу, коли кількість вільних радикалів перевищує захисні можливості антиоксидантів, що негативно впливає на функціональний стан печінки та репродуктивну систему корів. Встановлено, що надлишкове утворення аміаку та сечовини може активувати процеси пероксидації ліпідів і знижувати антиоксидантний захист організму, що підвищує ризик метаболічних захворювань у високопродуктивних корів [1, 113]. Встановлено, що високі концентрації MUN можуть змінювати кислотно-лужний баланс внутрішньоматкового середовища, впливати на життєздатність сперматозоїдів і ранніх ембріонів, що призводить до зниження запліднюваності та подовження сервіс-періоду [19, 100]. Крім того, надлишковий азот у раціоні асоціюється з підвищеним ризиком розвитку метаболічних порушень, зокрема в період ранньої лактації, коли корови перебувають у стані негативного енергетичного балансу.

Численними дослідженнями встановлено тісний кореляційний зв’язок між концентраціями BUN і MUN, що зумовлено спільними фізико-хімічними властивостями сечовини та її здатністю швидко проходити гематомолочний бар’єр [54, 56, 76]. Висока проникність гематомолочного бар’єра для сечовини обумовлює швидке вирівнювання її концентрації між кров’ю та молоком. Завдяки цьому показник MUN може використовуватися як непрямий індикатор системного азотного обміну, що значно спрощує моніторинг метаболічного статусу корів у виробничих умовах [106, 117]. Рівень BUN, MUN і UUN використовується також як індикатор екологічних проблем, пов’язаних з викидами метану в жуйних [139]. Сечовина має низьку молекулярну масу, завдяки чому швидко долає гематологічний бар’єр при переході в молоко, що призводить до сильного зв’язку між концентрацією BUN і MUN, який є ефективним інструментом для виявлення потенційних проблем у молочних стадах [55].

Водночас інтерпретація показників сечовини повинна здійснюватися з урахуванням комплексу фізіологічних і технологічних чинників, включаючи стадію

лактації, рівень продуктивності, споживання сухої речовини, водний режим, пору року та умови утримання тварин. У період ранньої лактації зміни рівня MUN можуть не повністю відображати білкову забезпеченість раціону, що зумовлює необхідність комплексного підходу до оцінки метаболічного стану корів.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють взаємозв'язку концентрації сечовини з ефективністю використання азоту кормів та рівнем продуктивності молочних корів. Встановлено, що ефективність використання азоту значною мірою залежить від співвідношення небілкових вуглеводів і сирого протеїну в раціоні. Метаналіз численних експериментальних досліджень показав, що оптимальні концентрації азоту сечовини в молоці пов'язані зі збалансованим співвідношенням небілкових вуглеводів до протеїну в межах приблизно 2,1–3,6. Порушення цього співвідношення призводить до зростання концентрації сечовини, збільшення екскреції азоту із сечею та зниження коефіцієнта використання азоту для синтезу молочного білка [139].

Важливим напрямом сучасних досліджень є оцінка генетичних та фенотипових факторів, що впливають на варіабельність рівня сечовини в молоці. Доведено, що концентрація MUN має низьку або помірну спадковість і може використовуватися як селекційна ознака для підвищення ефективності використання азоту та зменшення його втрат у навколишнє середовище. При цьому встановлено, що корови з нижчими показниками MUN характеризуються меншою екскрецією азоту та потенційно нижчим рівнем викидів азотовмісних сполук без суттєвого погіршення продуктивних характеристик [139].

Сучасні дослідження також демонструють, що рівень сечовини в молоці тісно пов'язаний із фізіологічними особливостями функціонування шлунково-кишкового тракту та нирок. Встановлено, що індивідуальні відмінності у швидкості кліренсу сечовини через нирки та інтенсивності її реабсорбції в травному каналі можуть зумовлювати значну частину варіації концентрації MUN між окремими тваринами.

Це свідчить про те, що інтерпретація показників сечовини повинна враховувати не лише раціон годівлі, але й індивідуальні фізіологічні особливості корів [114].

Важливим аспектом практичного використання показників сечовини є їх екологічне значення. Установлено, що надлишок азоту, який не використовується для синтезу молочного білка, виводиться з організму переважно у вигляді сечовини із сечею. Після потрапляння у зовнішнє середовище вона швидко розкладається під дією ферменту уреази з утворенням аміаку, який є джерелом забруднення повітря та ґрунтових вод. Тому контроль рівня MUN розглядається як ефективний інструмент оптимізації годівлі, зниження втрат азоту та підвищення екологічної безпеки молочного скотарства [124].

Останні дослідження також підтверджують економічну доцільність моніторингу рівня сечовини. Білкові компоненти корму є найдорожчими складниками раціону, тому перевитрата протеїну без відповідного енергетичного забезпечення призводить до зростання собівартості молока. Використання показника MUN дає змогу оперативно коригувати раціони, підвищувати коефіцієнт використання поживних речовин корму та зменшувати витрати на годівлю без зниження продуктивності тварин [32].

Крім того, сучасні дослідження свідчать про взаємозв’язок рівня сечовини з показниками здоров’я і відтворної здатності корів. Встановлено, що як надмірно високі, так і надто низькі значення MUN можуть негативно впливати на репродуктивні показники, метаболічний статус та загальну продуктивність тварин. Це підтверджує необхідність підтримання концентрації сечовини в оптимальному діапазоні та використання цього показника як інтегрального критерію оцінки ефективності годівлі та метаболічного стану молочних корів [85].

Сучасні дослідження підтверджують, що оптимізація рівня сечовини у молоці сприяє підвищенню ефективності використання кормів та зменшенню екологічного навантаження молочного виробництва. Використання показників азотного обміну у

поєднанні з сучасними технологіями моніторингу продуктивності дозволяє формувати адаптивні системи годівлі, які враховують індивідуальні потреби тварин та підвищують стабільність виробництва молока [34, 95].

Таким чином, показники сечовини в крові, молоці та сечі є інформативними маркерами та предикторами, які відображають інтегрований результат процесів перетравлення білка, обміну азоту та функціонального стану печінки і нирок. Вимірювання MUN може бути надійним показником для оцінки метаболічного стану тварин і коригування системи годівлі. Проте рівень сечовини не може слугувати універсальним маркером і повинен використовуватися лише в поєднанні з іншими біохімічними та зоотехнічними показниками в системі моніторингу годівлі й здоров'я великої рогатої худоби.

1.1.2. Роль мікробіоти рубця у метаболізмі сечовини та використанні азоту

Рубцева мікробіота є основною ланкою азотного обміну у жуйних тварин і відіграє вирішальну роль у процесах трансформації кормового азоту, утворенні аміаку та подальшому метаболізмі сечовини. Рубець функціонує як складна анаеробна ферментаційна камера, в якій відбувається постійна взаємодія мікроорганізмів різних таксономічних груп. Метагеномні дослідження показали, що функціональна активність рубцевої мікробіоти визначається не лише видовим складом, але й експресією генів – процесом реалізації спадкової інформації ДНК для створення функціональних продуктів, таких як РНК або білки. Цей процес відбувається через етапи транскрипції (синтез РНК) та трансляції (синтез білків) і є необхідною умовою «роботи» відповідних ферментів, які беруть участь у деградації білків і небілкових азотистих сполук. Ці процеси безпосередньо впливають на інтенсивність утворення аміаку та подальший синтез сечовини в організмі корів [40, 120]. Унікальна симбіотична система мікроорганізмів рубця дозволяє великій рогатій худобі ефективно використовувати корми різної якості, відпоідно з різним

вмістом органічних й неорганічних речовин, що має ключове значення для забезпечення високої молочної продуктивності. Стабільність рубцевої мікробної екосистеми забезпечується складною мережею трофічних взаємодій між бактеріями, найпростішими, грибами та археями. Бактерії здійснюють первинне розщеплення білкових компонентів корму, найпростіші регулюють чисельність бактеріальних популяцій шляхом фагоцитозу, а гриби беруть участь у руйнуванні структурних компонентів рослинної клітинної стінки. Така взаємодія створює умови для ефективного використання азоту кормів та підтримання стабільності ферментаційних процесів [80, 132]. У складі рубцевої мікробіоти бактерії, археї, найпростіші та гриби беруть участь у розщепленні білків і небілкових азотистих сполук з утворенням аміаку, який використовується для синтезу мікробного білка. Ефективність цього процесу залежить від синхронності надходження азоту та енергії, pH рубцевого середовища та швидкості пасажу кормових мас. Недостатня синхронізація ферментаційних процесів може призводити до зниження швидкості росту мікроорганізмів та накопичення аміаку у рубці. Надлишок аміаку всмоктується через стінку рубця у кров та транспортується до печінки, де піддається детоксикації з утворенням сечовини. Такий процес супроводжується підвищеним енергетичним навантаженням на організм корів і зниженням ефективності використання кормового азоту [43, 44, 106]. Порушення мікробного балансу призводить до накопичення аміаку та підвищеного синтезу сечовини в печінці корів [21, 67].

Мікробіота рубця відіграє ключову роль у процесах перетравлення корму та метаболізмі азоту у жуйних тварин. Встановлено, що структура мікробної популяції рубця швидко змінюється у відповідь на зміну раціону. Збільшення частки концентрованих кормів стимулює розвиток амілолітичних бактерій, тоді як підвищення вмісту клітковини сприяє росту целюлолітичних мікроорганізмів. Такі зміни безпосередньо впливають на інтенсивність ферментаційних процесів та

ефективність синтезу мікробного білка [51, 52, 93]. У рубці відбувається інтенсивне розщеплення білкових компонентів раціону з утворенням аміаку, який використовується мікроорганізмами длясинтезу мікробного білка або, у разі надлишку, всмоктується через стінку рубця в кров і перетворюється на сечовину в печінці [104].

Аміак у рубці може бути представлений у вигляді аміаку (NH_3) та аміачного азоту (NH_3-N), які відрізняються за способом вираження концентрації та біологічною інтерпретацією. Форма NH_3-N враховує лише масу атомів азоту, тоді як NH_3 відображає масу всієї молекули аміаку. Ці відмінності мають значення для оцінки ефективності використання азоту мікробіотою та стану здоров'я тварин [105]. Оптимальна концентрація аміаку у рубці забезпечує максимальну швидкість росту мікроорганізмів та синтез мікробного білка. Надлишкові концентрації аміаку можуть порушувати ферментаційні процеси та спричиняти токсичний вплив на клітини мікрофлори, тоді як його дефіцит обмежує синтез амінокислот мікробного походження [3, 110].

Гідроліз сечовини до аміаку та вуглекислого газу в рубці відбувається під дією ферменту уреази. Активність уреази підвищує pH рубцевого середовища, що впливає на склад та функціональну активність мікробної спільноти [104]. Регуляція активності уреази має важливе значення для підтримання стабільності рубцевого гомеостазу. Надмірна активність цього ферменту може спричиняти різкі коливання pH рубця, що впливає на видовий склад мікроорганізмів та ефективність ферментації кормів. У зв'язку з цим контроль швидкості гідролізу сечовини є важливим чинником оптимізації годівлі жуйних тварин [122, 130]. Надмірне накопичення аміаку може порушувати мікробний баланс та знижувати ефективність ферментаційних процесів. Порушення мікробного балансу супроводжується змінами у співвідношенні основних груп мікроорганізмів рубця, що впливає на утворення летких жирних кислот та енергетичне забезпечення організму корів. Такі зміни

можуть знижувати молочну продуктивність та ефективність використання поживних речовин [78, 112].

Метаногенез у рубці здійснюється спеціалізованою групою архей, які використовують переважно водень та вуглекислий газ як субстрати для утворення метану. Метаногенні археї формують складні симбіотичні взаємодії з бактеріями, які утворюють водень у процесі ферментації. Баланс між цими мікроорганізмами визначає ефективність використання енергії кормів та рівень утворення метану. Порушення цієї взаємодії може змінювати інтенсивність азотного обміну та утворення сечовини [40, 130]. Дослідження мікробної структури рубця показали, що низький рівень викидів метану пов’язаний з більшою чисельністю Methanobrevibacter ruminantium clade.

Встановлено, що ефективність використання азоту пов’язана з особливостями мікробіоти рубця. Останні дослідження показали, що корови з високою ефективністю використання азоту характеризуються більшим різноманіттям функціональних мікробних генів, пов’язаних із синтезом амінокислот та утилізацією аміаку. Це свідчить про можливість використання показників рубцевої мікробіоти як маркерів ефективності використання поживних речовин [70]. Корови з різною ефективністю використання азоту характеризуються відмінностями у складі та функціональній активності рубцевих мікроорганізмів. При цьому зменшення вмісту сирого протеїну у раціоні не завжди призводить до змін у мікробному різноманітті.

Функціональна пластичність рубцевої мікробіоти дозволяє тваринам адаптуватися до змін складу раціонів і фізіологічного стану організму. Доведено, що стабільність мікробної екосистеми рубця є важливим фактором підтримання продуктивності та метаболічного здоров’я корів. Урахування особливостей мікробіоти відкриває перспективи використання пробіотичних препаратів та кормових добавок для оптимізації азотного обміну [70, 132].

Таким чином, взаємодія між мікробіотою рубця та азотним обміном визначає ефективність використання поживних речовин, рівень утворення сечовини та екологічні наслідки виробництва молока. Розуміння цих процесів є необхідною передумовою для оптимізації годівлі та зменшення негативного впливу молочного скотарства на навколишнє середовище.

1.1.3. Сечовина як індикатор збалансованості годівлі та ефективності азотного обміну

Рівень азоту сечовини молока значною мірою визначається структурою раціону, зокрема співвідношенням сирого протеїну та енергії. Концентрація MUN використовується як індикатор ефективності використання азоту дійними коровами та оптимізації системи годівлі [85].

Додатково встановлено, що показник MUN може використовуватися як інструмент оцінки ефективності використання азоту на рівні стада, оскільки він відображає співвідношення між надходженням кормового протеїну та фактичним синтезом молочного білка. Дослідження свідчать, що коливання MUN часто випереджають зміни продуктивних показників і можуть використовуватися для ранньої діагностики дисбалансу раціонів, особливо у високопродуктивних корів [16, 17, 89]. Встановлено, що контрольні значення MUN, оптимальні для ефективності використання азоту, відрізняються від рівнів, необхідних для максимального синтезу молочного білка.

Збільшення виробництва молочного білка зазвичай спостерігається при концентрації азоту сечовини молока понад 11 мг/дл, тоді як ефективність використання білка є вищою за нижчих значень MUN [103]. Водночас встановлено, що оптимальні значення MUN можуть суттєво відрізнятися залежно від рівня продуктивності корів і технології виробництва молока. У високопродуктивних стадах допустимі межі MUN можуть бути дещо ширшими, оскільки інтенсивний

синтез молока супроводжується підвищеним оборотом азоту та більшою варіабельністю показників метаболізму. У зв’язку з цим оцінку рівня MUN рекомендується проводити з урахуванням стадії лактації та продуктивного навантаження на організм тварин [60, 61]. Для більшості країн оптимальний діапазон MUN коливається в межах 10–16 мг/дл молока, однак ці значення залежать від складу раціону та системи годівлі.

Під час перетравлення білка в рубці утворюється аміак, надлишок якого всмоктується в кров і перетворюється на сечовину в печінці. Більша частина сечовини виводиться з організму з сечею, однак певна її частка проникає в молоко. За умов дефіциту азоту в раціоні сечовина може реутилізуватися, повертаючись у рубець і знову перетворюючись на аміак [139]. Інтенсивність утворення аміаку в рубці залежить не лише від кількості протеїну, але й від швидкості його деградації та активності мікробної популяції. Доведено, що використання кормів із різною швидкістю розщеплення протеїну дозволяє регулювати синхронність надходження азоту та енергії, що позитивно впливає на ефективність синтезу мікробного білка та знижує рівень MUN. Такий підхід є одним із ключових принципів сучасних систем точного балансування раціонів молочних корів [87, 111].

Структура сирого протеїну в раціоні має принципове значення для метаболізму азоту. Сирий протеїн включає справжній білок та небілковий азот (NPN), який може бути використаний мікроорганізмами рубця для синтезу мікробного білка. Розрізняють розщеплюваний у рубці протеїн (RDP) та нерозщеплюваний протеїн (RUP), співвідношення яких впливає на рівень утворення аміаку та MUN [45, 131]. Важливим фактором регуляції азотного обміну є також співвідношення амінокислот у кормовому білку. Дефіцит незамінних амінокислот може призводити до неефективного використання азоту навіть за достатнього загального рівня протеїну в раціоні. Встановлено, що балансування раціонів за

лізином і метіоніном сприяє підвищенню ефективності використання азоту, зниженню рівня MUN і покращенню синтезу молочного білка [69, 134].

Окрім рівня сирого протеїну, важливу роль у формуванні концентрації MUN відіграють неструктурні вуглеводи (NFC), до яких належать цукор, крохмаль та пектин. Доведено, що співвідношення NFC/CP у раціоні суттєво впливає на рівень MUN, а при його перевищенні понад 14–16 мг/дл вміст сирого протеїну в раціоні, як правило, перевищує 17%, що призводить до збільшення екскреції азоту з сечею [139]. Доведено, що швидкість ферментації вуглеводів безпосередньо впливає на інтенсивність утилізації аміаку мікроорганізмами рубця. Раціони з підвищеним вмістом швидкоферментованого крохмалю забезпечують більш ефективне використання азоту, однак надлишок легкоперетравних вуглеводів може спричиняти ризик ацидозу рубця. У зв'язку з цим сучасні підходи до балансування раціонів передбачають оптимізацію співвідношення структурних і неструктурних вуглеводів для підтримання стабільної рубцевої ферментації [29, 90].

Низькі значення MUN (<8–10 мг/дл) можуть свідчити про дефіцит білка або зниження активності рубцевої мікробіоти, що обмежує синтез мікробного білка та продуктивність корів. Високі рівні MUN (>12–14 мг/дл) пов'язані з надлишком харчового (кормового) білка, дисбалансом між білком та енергією, а також можуть бути наслідком включення соди в раціон як профілактичного засобу проти кетозу [104]. Окрім складу раціону, на рівень MUN можуть впливати індивідуальні особливості споживання корму та генетичні характеристики корів. Встановлено, що тварини з вищою ефективністю використання азоту характеризуються нижчими концентраціями MUN за однакових умов годівлі. Це свідчить про можливість використання показника MUN як додаткового селекційного критерію підвищення кормової ефективності молочних корів [70, 137].

Сучасні системи годівлі молочної худоби базуються на принципах точного забезпечення тварин поживними речовинами відповідно до їх продуктивності,

фізіологічного стану та стадії лактації. Особливу роль у цих системах відіграє контроль білково-енергетичного живлення, оскільки саме порушення балансу між надходженням протеїну та енергії є однією з головних причин неефективного використання азоту кормів. У цьому контексті показники сечовини в крові та молоці розглядаються як інтегральні маркери, що дозволяють оцінювати не лише адекватність раціонів, але й функціональний стан рубця, печінки та загальну метаболічну адаптацію корів до умов інтенсивного виробництва [105]. У наукових дослідженнях показано, що рівень сечовини тісно пов’язаний із структурою раціону, зокрема вмістом сирого протеїну, співвідношенням між розщеплюваним та нерозщеплюваним у рубці протеїном, а також із рівнем ферментованих вуглеводів. Автори підкреслюють, що навіть за однакового вмісту сирого протеїну різна синхронізація надходження азоту та енергії може зумовлювати істотні відмінності в концентрації MUN, що має важливе практичне значення для оптимізації годівлі корів [42, 46].

Сучасні технології управління годівлею передбачають використання показників сечовини у поєднанні з цифровими системами моніторингу продуктивності та метаболічного статусу тварин. Автоматизований аналіз MUN дозволяє оперативно оцінювати ефективність раціонів, прогнозувати зміни продуктивності та своєчасно коригувати систему годівлі відповідно до фізіологічних потреб корів. Використання таких підходів підвищує точність управління молочним стадом і сприяє зниженню витрат кормових ресурсів [5, 11].

Таким чином, контроль концентрації сечовини в молоці є важливим інструментом практичного управління годівлею молочних корів, що дозволяє одночасно підвищувати ефективність використання кормів, зменшувати ризик метаболічних порушень та мінімізувати негативний вплив тваринництва на навколишнє середовище.

1.2. Показники сечовини та їх зв'язок із продуктивністю і здоров'ям корів

1.2.1. Взаємозв'язок BUN, MUN та UUN з продуктивними та фізіологічними показниками корів

У сучасному молочному скотарстві показники азотного обміну набувають особливого значення як інструменти оцінки ефективності використання поживних речовин кормів та метаболічного статусу тварин. Сечовина, яка є кінцевим продуктом катаболізму азотистих сполук, характеризується високою мобільністю між біологічними рідинами організму, що забезпечує її рівномірний розподіл між кров'ю, молоком та сечею. Завдяки цій фізіологічній особливості показники BUN, MUN та UUN розглядаються як взаємопов'язані індикатори інтенсивності білкового обміну та ефективності використання азоту кормів [43, 114]. Важливо підкреслити, що показники BUN, MUN та UUN відображають не лише «статичний» рівень сечовини в компартментах організму, а й динаміку азотного потоку між рубцем, печінкою, молочною залозою та нирками. Зокрема, швидка дифузія сечовини (лат. Diffusio- проникнення, розтікання, розсіювання) через тканинні бар'єри зумовлює високу чутливість MUN до короткострокових змін у годівлі, тоді як UUN більшою мірою характеризує сумарний добовий результат використання азоту та водного обміну. У цьому контексті інтерпретація взаємозв'язків між BUN–MUN–UUN має ґрунтуватися на розумінні процесу time-lag (від англ. Lag- затримка), коли відбувається тимчасова затримка між ферментаційними процесами в рубці та нирковою екскрецією, що особливо актуально при груповій оцінці стада [117].

Встановлено, що концентрація сечовини в різних біологічних середовищах формується під впливом складної взаємодії процесів мікробіальної ферментації в рубці, синтезу сечовини в печінці та її подальшого транспорту і виділення з організму. При цьому BUN відображає системний рівень азотного метаболізму, MUN характеризує баланс білково-енергетичного живлення та ефективність синтезу мікробного білка, тоді як UUN безпосередньо відображає втрати азоту з організму та

екологічне навантаження тваринництва [18, 116]. З позицій прикладної біології продуктивності, найбільш цінним є одночасне використання цих трьох показників для відокремлення «харчового» та «фізіологічного» компонентів мінливості. Так, підвищення MUN на тлі стабільного BUN може свідчити про короткочасні коливання в синхронізації рівня азоту та рівня енергії в рубці (зміни режиму згодовування, відбір корму, перерозподіл концентратів, сепарація корму самою коровою), тоді як паралельне зростання BUN і MUN зазвичай більш типове для систематичного протеїнового «перекриття» або обмеження доступної енергії. Натомість підвищення UUN при відносно помірному MUN частіше інтерпретують як наслідок підвищеного діурезу/споживання води або змін у нирковому кліренсі (від англ. Clearance- просвіт) сечовини, що формує потребу у корекції оцінок за параметрами водного режиму [7].

Особливу увагу дослідники приділяють взаємозв’язку між показниками BUN, MUN та UUN у зв’язку з їх високою інформативністю щодо продуктивних і фізіологічних характеристик молочних корів. Доведено, що коливання концентрації сечовини можуть відображати зміни споживання сухої речовини, інтенсивності ферментаційних процесів у рубці, рівня синтезу мікробного білка та функціонального стану печінки нирок. Використання комплексної оцінки цих показників дозволяє більш точно прогнозувати продуктивність тварин, ефективність використання кормів і ризик розвитку метаболічних порушень [23, 139]. Встановлено, що міжтваринна мінливість MUN може бути суттєвою навіть за однакових умов годівлі та утримання. Така варіабельність частково пояснюється індивідуальними відмінностями у швидкості кліренсу сечовини через нирки та інтенсивності її реабсорбції у травному каналі. Отже, інтерпретація «аномально» високих або низьких значень MUN на рівні окремої корови має враховувати фізіологічні особливості тварини та можливі відмінності у швидкості пасажу кормової маси і водного обміну [114].

Сучасні підходи до управління годівлею молочних корів передбачають використання показників азоту сечовини як інструментів моніторингу оптимальності раціонів. Встановлено, що зміни співвідношення протеїну та енергії в раціоні швидко відображаються на рівнях BUN, MUN і UUN, що дозволяє оперативно коригувати систему годівлі та підвищувати ефективність виробництва молока. Однак у практичних умовах ферми необхідно враховувати, що показники сечовини відзначаються добовою мінливістю, зумовленою режимом годівлі та доїння. У зв'язку з цим порівняння значень MUN між групами або різними періодами має ґрунтуватися на стандартизації часу відбору проб (наприклад, прив'язка до певного доїння або до інтервалу після згодовування раціону). Відомо, що саме діурез, інтенсивність споживання води та частота годування здатні зміщувати співвідношення MUN↔UUN, що важливо для правильної інтерпретації екологічних висновків [117]. Крім того, контроль цих показників має важливе значення для зменшення втрат азоту з організму та зниження негативного впливу молочного скотарства на довкілля [9, 75].

Концентрація MUN тісно пов'язана з показниками продуктивності та якості молока, а також з іншими біохімічними параметрами крові та обміну речовин. Дослідження показують, що надходження рослинного білка та енергії, а також їх синхронізована взаємодія в рубці є основними факторами, що впливають на концентрацію MUN, що дозволяє використовувати цей показник як індикатор ефективності використання поживних речовин [114].

Встановлено, що збільшення виробництва молочного білка можливе за рівня азоту сечовини молока понад 11 мг/дл, тоді як ефективність використання білка зазвичай знижується при перевищенні цього рівня [103]. Оптимальні значення MUN для більшості популяцій корів коливаються в межах 10–14 мг/дл, хоча рекомендовані діапазони можуть змінюватися залежно від країни та системи виробництва. Доцільно зауважити, що «оптимальність» діапазону MUN у

виробничих умовах має дві площини: (1) підтримання продуктивності та компонентного складу молока і (2) мінімізація втрат азоту з екскрементами. У зв'язку з цим на рівні стада рекомендують оцінювати не лише середнє значення MUN, а й його розподіл (частка корів, що виходить за межі цільового діапазону), оскільки саме неоднорідність групи часто сигналізує про технологічні збої в годівлі або групуванні [18].

Показники MUN корелюють з BUN та екскрецією UUN, однак характер цих зв'язків є варіабельним і залежить від ряду факторів, зокрема споживання води, частоти годування та доїння, рівня білка в раціоні та живої маси тварин [117, 118]. Окремий пласт факторів варіабельності BUN/MUN/UUN пов'язаний із кліматичним стресом, насамперед тепловим. Під впливом теплового стресу змінюються споживання сухої речовини, водний режим, гормональний профіль і спрямованість метаболічних реакцій, що може супроводжуватися зрушеннями в концентрації MUN та її прогностичній цінності щодо UUN. Це означає, що в літні періоди або при підвищенні THI доцільно інтерпретувати MUN у поєднанні з показниками продуктивності та ознаками теплового навантаження [22, 127]. Врахування цих чинників дозволяє підвищити точність використання MUN як предиктора ефективності використання азоту.

Біохімічні показники крові також пов'язані з рівнем сечовини. Так, у високопродуктивних корів виявляли підвищені концентрації азоту сечовини крові, сироваткового білка, креатиніну, тригліцеридів, холестерину та бета-гідроксимасляної кислоти [89]. У прикладному аспекті це підтверджує необхідність комплексного трактування BUN/MUN як частини метаболічного профілю стада. У періоди негативного енергетичного балансу або за наявності субклінічних порушень (наприклад, кетозного ризику) зв'язок між MUN і продуктивністю може послаблюватися або набувати «помилкових» інтерпретацій, якщо не враховувати зазначені енергетичні та печінкові маркери. Тому в дослідженнях і практиці

обґрунтованим є використання багатофакторних моделей, де MUN розглядається разом із надоями, компонентним складом, BHB/NEFA (за наявності), а також стадією лактації [119]. Подібні взаємозв'язки свідчать про інтегрований характер показника MUN у системі метаболічної регуляції.

Окрім цього, встановлено зв'язок між концентрацією MUN та викидами метану. Незважаючи на однакові умови годівлі, вихід метану може суттєво відрізнятися між окремими коровами, що частково пояснюється відмінностями у структурі мікробіоти рубця [25]. У сучасних підходах до оцінки екологічної ефективності молочного виробництва MUN дедалі частіше розглядають як доступний «польовий» проксі-індикатор азотного навантаження, який може інтегруватися у системи сталого менеджменту. Водночас результати багатьох робіт показують, що зв'язок MUN із фактичними втратами азоту та парниковими ефектами є контекст-залежним (тип годівлі, рівень протеїну, продуктивність, водний режим), а отже потребує обережності й підкріплення додатковими даними, зокрема оцінками азотного балансу [23, 24]. При цьому MUN позитивно корелює з екскрецією азоту з сечею, а зниження споживання сирого протеїну супроводжується зменшенням як MUN, так і UUN.

Показники концентрації BUN, MUN та UUN широко використовуються у сучасному молочному скотарстві як інтегральні індикатори білково-енергетичного обміну, ефективності використання азоту та фізіологічного стану високопродуктивних корів [54]. Взаємозв'язок між цими показниками обумовлений єдиним метаболічним походженням сечовини, а також особливостями її транспорту між біологічними компартментами організму.

Численними дослідженнями встановлено тісний кореляційний зв'язок між рівнями BUN і MUN, що пояснюється вільною дифузією сечовини через гематомолочний бар'єр. При цьому MUN вважається більш зручним показником для практичного використання, оскільки його визначення не потребує інвазивних

методів і може здійснюватися в рамках регулярного контролю якості молока [55, 138]. Рівень UUN, у свою чергу, безпосередньо відображає втрати азоту з сечею і має особливе значення при оцінці екологічного навантаження та ефективності використання протеїну в раціоні.

Встановлено, що концентрація MUN тісно пов’язана з рівнем молочної продуктивності корів. За оптимальних умов годівлі помірні значення MUN асоціюються з високими надоями та стабільним вмістом білка в молоці. Водночас надмірно високі рівні MUN часто супроводжуються зниженням коефіцієнта конверсії корму та зростанням частки азоту, втраченого з сечею, що свідчить про неефективне використання кормового протеїну [46, 76].

Фізіологічний стан корів істотно впливає на рівні BUN і MUN. У період ранньої лактації, коли тварини перебувають у стані негативного енергетичного балансу, спостерігається підвищена мобілізація тканинних резервів та зміни у метаболізмі азоту, що може призводити до коливань концентрації сечовини незалежно від фактичного вмісту протеїну в раціоні. У таких умовах інтерпретація показників MUN потребує особливої обережності та врахування комплексу супутніх факторів [67].

Рівень MUN також корелює з показниками складу молока. Низка авторів повідомляє про негативний зв’язок між високими концентраціями MUN та вмістом молочного білка, що пояснюється зниженням ефективності синтезу мікробного білка в рубці за умов дисбалансу між надходженням азоту та енергії. Водночас за адекватної синхронізації ферментаційних процесів у рубці помірні значення MUN асоціюються з оптимальним вмістом білка та жиру в молоці [16, 21].

Значний інтерес становить взаємозв’язок між показниками сечовини та відтворною здатністю корів. Підвищені рівні BUN і MUN асоціюються з погіршенням запліднюваності, подовженням сервіс-періоду та зниженням індексу відтворення. Механізми цього впливу пов’язують зі змінами кислотно-лужного

балансу маткового середовища, а також із негативним впливом надлишкового азоту на ранні етапи ембріонального розвитку [19, 100]. Уточнюючи причинно-наслідкову інтерпретацію, доцільно посилатися на дані мета-аналітичних узагальнень, де підвищені рівні сечовини у крові/молоці асоціювалися зі статистично значущим зниженням шансів настання тільності. При цьому запропоновано порогові значення, вище яких негативний ефект проявляється більш стабільно. Такі висновки підсилюють аргументацію щодо управлінського значення моніторингу BUN/MUN як складової профілактики репродуктивних втрат у стаді [58, 98].

Показник UUN використовується переважно в експериментальних дослідженнях для кількісної оцінки втрат азоту з організму. Доведено, що підвищення MUN, як правило, супроводжується зростанням екскреції азоту з сечею, однак характер цього зв’язку залежить від рівня споживання сухої речовини, складу раціону та індивідуальних особливостей тварин. У зв’язку з цим MUN розглядається як зручний, але непрямий індикатор екскреції азоту, який потребує корекції з урахуванням інших параметрів [76]. У цьому аспекті перспективним є застосування емпіричних моделей, що оцінюють екскрецію азоту на основі комбінації MUN із даними про надої, вміст білка та породу. Показано, що точність таких моделей підвищується при урахуванні породних відмінностей та виробничих умов, що робить їх придатними для прикладних цілей – від екологічного звітування до економічної оптимізації білкової складової раціону [18, 124].

Таким чином, рівень сечовини в молоці відображає складну систему взаємопов’язаних фізіологічних, продуктивних та екологічних показників. Його використання у поєднанні з іншими параметрами дозволяє більш точно оцінювати метаболічний статус корів та ефективність виробництва молока. Показники BUN, MUN та UUN перебувають у тісному взаємозв’язку з продуктивними, біохімічними та фізіологічними характеристиками корів. Їх комплексне використання дозволяє більш повно оцінювати ефективність годівлі, метаболічний стан тварин та

потенційні ризики для здоров’я й відтворної здатності, що обґрунтовує доцільність застосування цих показників у системах моніторингу сучасних молочних ферм.

1.2.2. Вплив рівня сечовини на здоров’я та відтворну здатність

Рівень сечовини є чутливим індикатором стану здоров’я лактуючих корів, оскільки відображає баланс між споживанням білка, енергії та ефективністю їх використання в організмі. Відхилення концентрації азоту сечовини молока від оптимальних значень пов’язані з порушеннями обміну речовин і можуть супроводжуватися зниженням репродуктивної здатності, проблемами з ратицями та зменшенням продуктивності [103].

Додатково встановлено, що відхилення рівня сечовини від оптимальних меж можуть бути пов’язані з порушеннями адаптаційних механізмів організму до лактаційного навантаження. У високопродуктивних корів надлишкове або недостатнє утворення сечовини часто відображає дисбаланс між катаболічними та анаболічними процесами, що призводить до зниження метаболічної гнучкості та підвищення ризику розвитку субклінічних форм метаболічних захворювань [49, 74].

Негативний енергетичний баланс -NEB (від англ. Negative energy balance) є поширеним явищем на початку лактації, коли корови не здатні споживати достатню кількість сухої речовини для покриття енергетичних потреб. Мобілізація жирових резервів супроводжується підвищенням концентрації неетерифікованих жирних кислот (NEFA) у крові, що підвищує ризик кетозу та синдрому жирової печінки [104].

За умов негативного енергетичного балансу відбувається не лише інтенсивна мобілізація жирових резервів, але й зміни у білковому обміні, що може супроводжуватися коливаннями концентрації сечовини незалежно від рівня протеїну в раціоні. Встановлено, що підвищені концентрації NEFA та бета-гідроксимасляної кислоти асоціюються зі змінами у функціональному стані печінки, що обмежує її

детоксикаційний потенціал і може впливати на інтенсивність синтезу сечовини [14, 36].

Біохімічні показники крові тісно пов’язані з рівнем сечовини та відображають функціональний стан печінки і нирок. У кетозних корів відмічали значно вищі рівні аспартатамінотрансферази (AST), що свідчить про ураження печінки та активацію апоптотичних процесів [105].

Порушення функціонального стану печінки мають ключове значення для інтерпретації рівня сечовини, оскільки саме цей орган є центральною ланкою детоксикації аміаку. Зниження метаболічної здатності гепатоцитів може призводити як до накопичення токсичних метаболітів, так і до неадекватної регуляції орнітинового циклу, що ускладнює використання показника сечовини як ізольованого діагностичного критерію [72, 126].

Показники креатиніну використовуються для оцінки фільтраційної функції нирок, оскільки у здоровому організмі процес фільтрації відбувається постійно, а рівень креатиніну в крові є стабільним. Відхилення цих показників у поєднанні зі змінами MUN можуть вказувати на порушення функції нирок.

Сезонні та паратипові чинники впливають на біохімічний профіль крові та рівень сечовини. Доведено вплив сезону виробництва на загальний білок, глобулін, креатинін, лужну фосфатазу, фосфор, натрій і хлор, що необхідно враховувати при інтерпретації метаболічного статусу лактуючих корів [24].

Окрім сезонних коливань, на рівень сечовини впливають паратипові чинники, зокрема система утримання, мікроклімат приміщень, кратність доїння та індивідуальні особливості споживання корму. Умови теплового стресу, характерні для літнього періоду, можуть призводити до зниження споживання сухої речовини, зміни гормонального профілю та порушення білково-енергетичного балансу, що відображається у варіабельності показників сечовини [94, 133].

Рівень сечовини в крові, молоці та сечі розглядається як один із ключових інтегральних біохімічних показників, що характеризують стан білково-енергетичного обміну та метаболічне здоров’я молочних корів. В умовах інтенсивного молочного скотарства, де високопродуктивні тварини зазнають значного фізіологічного навантаження, навіть помірні порушення азотного обміну можуть мати суттєві наслідки для здоров’я, тривалості продуктивного використання та відтворної здатності корів [105].

Численні дослідження свідчать, що підвищені концентрації азоту сечовини в крові та молоці часто асоціюються з дисбалансом між надходженням протеїну та енергії в раціоні, що призводить до надлишкового утворення аміаку в рубці та посиленого навантаження на детоксикаційні системи організму. За таких умов активується орнітиновий цикл у печінці, зростає синтез сечовини та її екскреція, що супроводжується підвищеними втратами азоту та зниженням ефективності використання кормів [43, 44, 45]

Метаболічний статус корів у період ранньої лактації має особливе значення для інтерпретації показників сечовини. У цей період більшість високопродуктивних корів перебувають у стані негативного енергетичного балансу, що супроводжується мобілізацією жирових і білкових резервів організму, змінами в гормональній регуляції та перерозподілом поживних речовин на користь молочної залози [67]. За таких умов рівень сечовини може змінюватися незалежно від фактичного вмісту протеїну в раціоні, що ускладнює його використання як єдиного діагностичного критерію.

Підвищений рівень сечовини нерідко асоціюється з підвищеним ризиком розвитку метаболічних порушень, зокрема кетозу, жирової дистрофії печінки та субклінічних форм ацидозу рубця. Надлишкове надходження протеїну за дефіциту енергії сприяє неефективному використанню азоту та посиленому утворенню аміаку,

що чинить токсичний вплив на клітини печінки та може погіршувати її детоксикаційну функцію [19, 21].

Метаболічний стрес, пов’язаний із порушенням азотного обміну, може чинити опосередкований вплив на відтворну систему через зміни гормонального фону та імунної реактивності організму. Доведено, що у корів із порушеним метаболічним статусом знижується концентрація інсуліноподібного фактора росту-1 та змінюється секреція гонадотропних гормонів, що негативно позначається на розвитку фолікулів і якості ооцитів [109, 135].

Особливу увагу в науковій літературі приділяють взаємозв’язку між рівнем сечовини та відтворною функцією корів. Встановлено, що високі концентрації BUN і MUN можуть негативно впливати на репродуктивні процеси на різних етапах — від дозрівання фолікулів до імплантації ембріона. Механізми цього впливу пов’язують зі змінами кислотно-лужного балансу маткового середовища, підвищенням концентрації аміаку та загальним метаболічним стресом організму [100].

Низка досліджень показала, що підвищений рівень MUN асоціюється зі зниженням запліднюваності, подовженням сервіс-періоду та зменшенням частоти настання тільності після першого осіменіння. За даними Butler [19], корови з підвищеними показниками сечовини в молоці мали гірші репродуктивні результати порівняно з тваринами, у яких концентрація MUN перебувала в оптимальних межах.

Водночас слід зазначити, що вплив рівня сечовини на відтворну здатність не є лінійним і може варіювати залежно від породи, рівня продуктивності, умов утримання та загального метаболічного стану корів. У деяких дослідженнях не виявлено чіткого негативного впливу помірно підвищених значень MUN на показники відтворення, що свідчить про необхідність комплексного підходу до оцінки репродуктивного статусу тварин [76].

Таким чином, рівень сечовини є важливим показником, що інтегрує інформацію про метаболічний стан, ефективність годівлі та функціонування

відтворної системи корів. Контроль рівня сечовини у поєднанні з розширеним біохімічним аналізом крові дозволяє своєчасно виявляти ризики метаболічних захворювань, оцінювати функціональний стан печінки й нирок та приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо підтримання здоров'я стада. Використання сечовини в поєднанні з іншими біохімічними, зоотехнічними та клінічними показниками дозволяє більш повно оцінювати стан здоров'я тварин і своєчасно виявляти ризики розвитку метаболічних та репродуктивних порушень.

1.2.3. Практичне використання показників сечовини в управлінні молочними стадами

Управління сучасними молочними стадами ґрунтується на інтеграції зоотехнічних, біохімічних та економічних показників з метою підвищення продуктивності, збереження здоров'я тварин і мінімізації виробничих витрат. Сучасні системи управління молочним виробництвом дедалі більше базуються на принципах точного тваринництва, які передбачають використання цифрових технологій для аналізу продуктивних та метаболічних показників корів. Інтеграція інформації про склад молока, показники годівлі та фізіологічний стан тварин дозволяє приймати оперативні управлінські рішення, спрямовані на підвищення ефективності виробництва молока та стабілізацію економічних результатів ферми [12, 38]. У цьому контексті показники рівня сечовини в молоці та крові корів набули широкого практичного застосування як доступні індикатори ефективності годівлі та метаболічного стану стада в цілому. Використання MUN у практиці управління дозволяє оперативно оцінювати адекватність протеїнового живлення, своєчасно виявляти дисбаланс між надходженням азоту та енергії й коригувати раціони без зниження молочної продуктивності. Моніторинг рівня MUN використовується також для оцінки однорідності годівлі у групах корів та контролю якості кормів. Коливання показників сечовини у молоці можуть свідчити про нерівномірне

споживання корму або помилки у складанні раціонів, що дозволяє своєчасно коригувати систему годівлі та запобігати втратам продуктивності [64, 131]. Численні дослідження підтверджують, що систематичний контроль MUN сприяє підвищенню ефективності використання кормів, зменшенню втрат азоту та покращенню економічних показників виробництва [55, 138].

Ефективність використання кормів у молочному скотарстві є одним з ключових чинників економічної результативності виробництва молока, оскільки витрати на корми становлять від 50 до 60 % загальних виробничих витрат. Раціональне використання кормів безпосередньо пов’язане з оптимізацією структури раціонів та балансуванням поживних речовин відповідно до фізіологічного стану корів. Використання біохімічних показників молока, включаючи рівень сечовини, дозволяє підвищити точність оцінки ефективності годівлі та прогнозувати продуктивність тварин у різні періоди лактації [96, 121]. Зростання цін на енергетичні ресурси та корми підсилює необхідність оптимізації конверсії корму в продукцію [104].

Одним з інтегральних економічних показників у молочному скотарстві є IOFC (від англ. Income Over Feed Cost) – показник прибутковості молочної ферми, який відображає різницю між доходом від реалізації молока та витратами на корми для лактуючих корів. Показник IOFC широко використовується для оцінки економічної доцільності різних стратегій годівлі корів. Встановлено, що оптимізація рівня протеїну у раціоні дозволяє підвищити економічну ефективність виробництва молока без зниження продуктивності. Надлишкове використання білкових кормів збільшує витрати на годівлю та знижує рентабельність виробництва [2, 125]. Традиційно підвищення продуктивності досягалося шляхом використання високопродуктивних корів і підвищеного рівня протеїну в раціонах, однак така стратегія не завжди є економічно доцільною [103].

Близько 28 % азоту, що споживається молочними коровами з кормом, конвертується в молоко, причому близько 5 % виводиться у формі небілкового азоту, а решта представлена справжнім молочним білком [117]. Низька ефективність використання азоту призводить до економічних втрат і збільшення екологічного навантаження. Зниження ефективності використання азоту супроводжується збільшенням витрат на утилізацію гною та зростанням витрат на екологічний контроль виробництва. У сучасних умовах посилення екологічних стандартів виробництва молока контроль показників азотного обміну набуває не лише біологічного, але й економічного значення [95, 102].

Покращення ефективності використання корму сприяє не лише зниженню собівартості продукції, але й зменшенню викидів парникових газів та втрат азоту у навколишнє середовище [128]. У селекційних програмах молочного скотарства показники ефективності використання кормів дедалі частіше розглядаються як економічно важливі ознаки. Генетичний відбір корів із високою ефективністю використання поживних речовин дозволяє підвищити рентабельність виробництва молока та зменшити витрати кормів на одиницю продукції [79, 128]. У зв’язку з цим показники ефективності корму стають важливим напрямом селекційного покращення.

Рівень азоту сечовини молока використовується як практичний індикатор економічної ефективності годівлі, оскільки високі значення MUN свідчать про надлишкове використання дорогого білкового корму та неефективне використання азоту. Контроль MUN дозволяє оптимізувати раціони та підвищувати IOFC за рахунок раціонального використання протеїну. Практичне використання показників MUN передбачає встановлення цільових діапазонів концентрації сечовини для різних груп корів залежно від стадії лактації та рівня продуктивності. Такий підхід дозволяє диференційовано коригувати раціони, підвищувати ефективність використання кормів та зменшувати ризик метаболічних порушень [55, 101].

Систематичний моніторинг показників сечовини у поєднанні з автоматизованими системами контролю продуктивності дозволяє підвищити точність управління молочними стадами. Використання програм аналізу великих масивів даних забезпечує можливість прогнозування продуктивності корів та оптимізації економічних результатів молочного виробництва [57, 136].

Таким чином, поєднання економічних показників, ефективності використання кормів та моніторингу азоту сечовини молока створює основу для сталого та бізнес-привабливого виробництва молока.

1.3. Генетичні, екологічні та селекційні аспекти азотного обміну

1.3.1. Генетичні та селекційні аспекти рівня сечовини

Рівень сечовини в молоці та крові великої рогатої худоби у сучасних наукових дослідженнях розглядається не лише як показник годівлі та метаболічного стану, але і як кількісна ознака, що має генетичну зумовленість і може бути використана в селекційних програмах. Посилення уваги до цієї ознаки пов’язане з глобальними тенденціями підвищення ефективності використання азоту кормів, зменшення екологічного навантаження та формування сталих систем молочного скотарства. В роботах багатьох авторів показано, що MUN характеризується помірною спадковістю, яка залежить від породи, стадії лактації та рівня продуктивності [83]. Коефіцієнти спадковості, отримані в різних популяціях, коливаються в межах 0,10–0,30, що свідчить про наявність генетичної детермінації цієї ознаки поряд із сильним впливом факторів середовища. Це відкриває можливості для включення показників сечовини до селекційних індексів за умови комплексної оцінки інших економічно важливих ознак [13, 83, 121]. Дослідження останніх років свідчать, що генетична мінливість показників сечовини може бути пов’язана з відмінностями у регуляції процесів синтезу та утилізації амінокислот, а також із функціональною активністю ферментних систем, що беруть участь у трансформації азотистих сполук.

Встановлено, що генетичні варіації можуть впливати на ефективність рециклінгу (повторної переробки) сечовини у рубці, що визначає здатність тварин повторно використовувати азот кормів та зменшувати його втрати з організму [70, 96].

Дослідження показують, що варіація концентрації MUN між окремими тваринами частково обумовлена спадковими відмінностями у метаболізмі азоту та транспорті сечовини [114]. Сучасні геномні підходи дозволили встановити зв'язок між рівнем сечовини та низкою генетичних локусів, які контролюють білковий і енергетичний обмін. Використання методів геномної асоціації-GWAS (від англ. genome-wide association studies) дозволило ідентифікувати маркери, що асоційовані з ефективністю використання азоту, інтенсивністю синтезу молочного білка та метаболічною адаптацією корів у різні періоди лактації. Це відкриває можливості для більш точного прогнозування селекційної цінності тварин за показниками азотного обміну [31, 128].

Породні особливості істотно впливають на біохімічні показники крові та рівень сечовини. Доведено вплив фактора породи на концентрацію загального білірубіну, сечовини, креатиніну, аланінамінотрансферази, аспартатамінотрансферази, альбуміну та загального білка [105]. Встановлено, що породні відмінності у рівні сечовини можуть відображати різну інтенсивність метаболічних процесів, швидкість синтезу молока та адаптаційні можливості організму до лактаційного навантаження. Спеціалізовані молочні породи характеризуються більш інтенсивним обігом азоту, тоді як комбіновані породи демонструють більш стабільні показники азотного метаболізму. Ці особливості необхідно враховувати під час оцінки селекційної цінності тварин та формування племінних програм [8, 65]. Такі відмінності проявляються навіть за однакових умов годівлі та утримання, що підтверджує генетичну зумовленість цих показників.

Оцінки спадковості рівня азоту сечовини молока є помірними, що дозволяє припустити можливість селекційного відбору за цією ознакою. Водночас низькі або

майже нульові генетичні кореляції між MUN та іншими компонентами молока свідчать про відсутність ризику небажаних корельованих реакцій при селекції. Особливий інтерес становить дослідження взаємозв'язку між показниками сечовини та функціональним довголіттям корів [79]. Встановлено, що тварини з генетично зумовленою більшою ефективністю використання азоту характеризуються нижчою частотою метаболічних порушень і кращими показниками виживаності у стаді. Це свідчить про перспективність включення показника MUN до селекційних індексів, спрямованих на підвищення стійкості корів до метаболічного стресу [79].

Метааналізи підтверджують наявність генетичної мінливості показників сечовини. Зокрема, оцінки успадковуваності для MU та MUN були низькими, але статистично значущими, а генетичні кореляції з продуктивними ознаками залишалися слабкими [79]. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється екологічному аспекту селекції молочної худоби. Доведено, що генетичний відбір корів із нижчим рівнем сечовини у молоці сприяє зменшенню екскреції азоту з сечею та зниженню утворення аміаку в навколишньому середовищі. Це дозволяє розглядати показник MUN як селекційний критерій підвищення екологічної ефективності молочного виробництва [25]. Це відкриває можливості використання MUN як допоміжного селекційного критерію.

Ефективність селекції за показниками сечовини значною мірою залежить від взаємодії генотипу та умов середовища. Доведено, що прояв генетичного потенціалу використання азоту може змінюватися залежно від рівня годівлі, системи утримання та кліматичних факторів. Урахування генотип-середовищної взаємодії дозволяє підвищити точність селекційних програм і забезпечити стабільний прояв бажаних ознак у різних виробничих умовах [59, 84].

Таким чином, урахування генетичного фактора поряд з умовами годівлі та середовища дозволяє більш повно інтерпретувати мінливість рівня сечовини у молочних корів. Поєднання фенотипових і генетичних підходів створює передумови

для підвищення ефективності використання азоту та сталого розвитку молочного скотарства.

1.3.2. Екологічні аспекти азотного обміну

У сучасних умовах розвитку тваринництва проблема екологічної безпеки та зменшення негативного впливу молочного скотарства на навколишнє середовище набуває особливої актуальності. Одним із ключових екологічних викликів галузі є надмірне виділення азоту з екскрементами тварин, що призводить до забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, а також до викидів парникових газів. За сучасними оцінками, молочне скотарство формує значну частку антропогенних викидів реактивного азоту у біосферу. Неефективне використання кормового протеїну призводить до накопичення азотовмісних сполук у гної та сечі, що сприяє їх подальшій трансформації у леткі сполуки. У зв’язку з цим оптимізація білкового живлення корів розглядається як один із ключових напрямів екологізації молочного виробництва [33, 91]. У цьому контексті рівень сечовини в організмі корів розглядається як важливий індикатор ефективності використання азоту кормів і потенційного екологічного навантаження. Численні дослідження показують, що підвищені концентрації MUN супроводжуються зростанням екскреції азоту з сечею, яка є основним джерелом летких втрат аміаку та подальшого утворення оксидів азоту. Втрати азоту у вигляді аміаку та закису азоту мають суттєвий вплив на зміну клімату, формування кислотних дощів і евтрофікацію водних екосистем. Закис азоту характеризується високим потенціалом глобального потепління та значною тривалістю перебування в атмосфері. Його утворення пов’язане з мікробіологічними процесами нітрифікації та денітрифікації у ґрунті після внесення органічних добрив тваринного походження. Тому підвищення ефективності використання азоту кормів дозволяє суттєво зменшити обсяги утворення цього парникового газу [82, 102].

Зниження рівня сечовини шляхом оптимізації раціонів розглядається як ефективний інструмент екологічного менеджменту в молочному скотарстві [42, 46].

Сечовина та продукти азотного обміну у молочному скотарстві мають важливе екологічне значення, оскільки пов’язані з викидами азоту та парникових газів. Азот сечовини молока позитивно корелює з екскрецією азоту сечовини з сечею, і обидва показники знижуються зі зменшенням споживання сирого протеїну у раціоні [118]. Доведено, що ефективність використання азоту значною мірою залежить від синхронізації надходження протеїну та ферментованих вуглеводів у рубці. Забезпечення оптимального співвідношення поживних речовин сприяє активному синтезу мікробного білка та зменшенню втрат азоту з організму тварин, що позитивно впливає на екологічну ефективність виробництва молока [5, 28].

Сеча та фекалії великої рогатої худоби є значним джерелом втрат азоту в навколишнє середовище. Азот, що виділяється з екскретами, може випаровуватися у вигляді аміаку або потрапляти у ґрунтові та поверхневі води, спричиняючи їх підкислення та евтрофікацію. Після потрапляння у ґрунт азотисті сполуки проходять складні процеси біохімічної трансформації, що включають мінералізацію органічного азоту та утворення нітратів. Накопичення нітратів у водних екосистемах може призводити до порушення трофічної рівноваги та погіршення якості питної води. У зв’язку з цим сучасні екологічні стратегії тваринництва спрямовані на зменшення азотного навантаження ще на рівні годівлі тварин [62, 95]. Таким чином, контроль рівня MUN розглядається як один із практичних інструментів зменшення екологічного навантаження.

Окрім азотних викидів, показники сечовини пов’язані з утворенням метану у рубці жуйних. Незважаючи на однакові умови годівлі, вихід метану може істотно відрізнятися між окремими коровами, що пояснюється відмінностями у складі та активності рубцевої мікробіоти. Метаногенез здійснюється археями, які використовують переважно водень та вуглекислий газ як субстрати для синтезу

метану. Інтенсивність утворення метану залежить від складу раціону та швидкості ферментаційних процесів у рубці. Встановлено, що зміна співвідношення клітковини та концентрованих кормів впливає на профіль утворення летких жирних кислот та рівень утворення водню, який є основним субстратом для метаногенних мікроорганізмів. Таким чином, оптимізація раціонів дозволяє одночасно регулювати процеси утворення метану та ефективність використання азоту кормів [19, 63].

Дослідження показують, що зниження рівня сирого протеїну в раціонах молочних корів дозволяє зменшити екскрецію азоту без суттєвого впливу на мікробний склад та функціональні профілі рубця [137]. За таких умов концентрація MUN знижується, що супроводжується зменшенням втрат азоту з сечею. Сучасні технології годівлі передбачають використання біологічно активних кормових добавок, здатних регулювати процеси деградації протеїну у рубці. Застосування танінів, ефірних олій та ферментних препаратів дозволяє підвищити ефективність використання азоту кормів і знизити рівень сечовини без негативного впливу на продуктивність тварин [53, 92].

В умовах розвитку біоенергетики доведено можливість використання органічних відходів тваринництва для виробництва біогазу. Зокрема, показано, що попередня обробка рослинної біомаси сечовиною може підвищувати вихід метану при анаеробному зброджуванні [41]. Це підкреслює подвійне значення сечовини як чинника екологічного ризику та потенційного ресурсу. Розвиток біогазових технологій у тваринництві дозволяє ефективно утилізувати органічні відходи виробництва та сприяє формуванню замкненого циклу використання поживних речовин. Анаеробне зброджування гною та сечі корів забезпечує виробництво відновлюваної енергії, знижує викиди парникових газів і підвищує агрохімічну цінність органічних добрив, що відповідає сучасним принципам сталого розвитку аграрного сектору [41, 81].

Таким чином, моніторинг азоту сечовини молока дозволяє одночасно оцінювати ефективність використання азоту, рівень екологічного навантаження та можливості зниження викидів азоту і метану у молочному скотарстві.

1.4. Сучасні методи оцінки рівня сечовини та прогнозування ефективності азотного обміну

Удосконалення систем моніторингу стану годівлі та метаболічного здоров'я молочних корів зумовило розвиток сучасних методів оцінки рівня сечовини та пов'язаних із нею показників азотного обміну. Сучасні системи управління молочним виробництвом базуються на концепції точного тваринництва, що передбачає використання цифрових технологій для безперервного контролю фізіологічного стану тварин. Інтеграція біохімічних показників молока, включаючи рівень сечовини, з автоматизованими системами збору даних дозволяє оперативно виявляти порушення метаболічного статусу та коригувати систему годівлі у режимі реального часу [12, 108]. Традиційні лабораторні методи визначення концентрації сечовини в крові та молоці залишаються еталонними, проте в умовах промислового молочного виробництва зростає потреба у швидких, недорогих і неінвазивних підходах, які дозволяють здійснювати регулярний контроль великих масивів даних. До класичних лабораторних методів належать ферментативні та колориметричні методики визначення сечовини, які характеризуються високою точністю та відтворюваністю результатів. Однак їх використання обмежене значними витратами часу та необхідністю відбору біологічних проб, що ускладнює проведення масового моніторингу стада. Це стимулює розвиток експрес-методів визначення біохімічних показників молока [64, 101]. Одним із найбільш поширених інструментів оцінки рівня сечовини в молоці є інфрачервона спектроскопія середнього діапазону- MIR (від англ. mid-range infrared spectroscopy), яка використовується в системах контролю якості молока. Цей метод базується на аналізі спектральних характеристик молока,

що дозволяє одночасно визначати широкий спектр біохімічних показників. Використання цього методу значно підвищує ефективність систем контролю якості молока та відкриває можливості для створення автоматизованих алгоритмів оцінки метаболічного статусу корів. Останні дослідження підтверджують високу кореляцію результатів MIR-аналізу з традиційними лабораторними методами визначення MUN [27, 115]. Цей метод дозволяє оперативно отримувати інформацію про MUN одночасно з визначенням вмісту жиру, білка та лактози. Численні дослідження підтверджують достатню точність MIR-методів для практичного використання, хоча їх калібрування потребує регулярного оновлення з урахуванням породних та регіональних особливостей [26, 35].

Сучасні підходи до аналізу даних у молочному скотарстві спрямовані на прогнозування кількісних та якісних показників молока з метою підтримки управлінських рішень на молочних фермах. Використання методів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє обробляти великі масиви даних, отриманих з автоматизованих систем доїння, контролю годівлі та моніторингу здоров’я тварин. Алгоритми прогнозування дозволяють виявляти приховані взаємозв’язки між показниками продуктивності, складом молока та біохімічними параметрами крові, що значно підвищує точність управлінських рішень [57, 136]. Аналітичні методи у поєднанні з оптимізаційними та математичними моделями дозволяють підвищувати точність прогнозування продуктивності та стану здоров’я корів [103].

За результатами аналізу останніх досліджень встановлено, що основна увага приділяється прогнозуванню молочної продуктивності, своєчасному виявленню кульгавості та маститів, що підтверджує зростання ролі прогнозного моделювання у практиці молочного скотарства [15].

Однією з відомих математичних моделей, що описують біохімічні процеси травлення у жуйних, є математична модель корови Molly та її модифікації. Ця

модель дозволяють прогнозувати динаміку ферментаційних процесів у рубці, швидкість утворення аміаку та синтез мікробного білка. Сучасні модифікації таких моделей враховують вплив складу раціонів, продуктивності корів та особливостей мікробіоти рубця, що підвищує точність оцінки ефективності використання поживних речовин [4, 29]. Удосконалення версій Molly84 та Molly85 дозволило зменшити помилки прогнозування та підвищити точність оцінки виробництва метану у жуйних тварин [34]. Подальший розвиток таких моделей пов’язують із кращим прогнозуванням утворення летких жирних кислот у рубці та змін у бродильних процесах.

Азот сечовини молока розглядається як зручний біомаркер для аналітичних моделей оцінки ефективності використання азоту. Використання MUN у поєднанні з даними про споживання кормів, структуру раціонів та продуктивність корів дозволяє розробляти інтегровані показники ефективності використання азоту. Такі індикатори використовуються для оцінки балансу поживних речовин у раціонах та прогнозування ризику метаболічних порушень у стаді [55, 131]. Показник MUN у поєднанні з іншими компонентами молока, величиною надою та живою масою корів використовується для розрахунку ефективності використання азоту молока (MNE), що дозволяє оцінювати баланс азоту в організмі тварин [45, 114].

Математичне моделювання на основі великих масивів даних дозволяє враховувати комплекс факторів, включаючи генетичні та паратипові впливи. Поєднання генетичних, технологічних та біохімічних параметрів у єдиних аналітичних моделях створює передумови для індивідуалізації годівлі корів. Персоналізовані системи годівлі дозволяють оптимізувати використання кормів та підвищувати продуктивність тварин при одночасному зменшенні екологічного навантаження молочного виробництва [79, 97]. Оцінка мінливості MUN разом з вмістом жиру, білка та лактози у молоці відкриває можливості для коригування раціонів та підвищення точності прогнозування продуктивних ознак [55].

Подальший розвиток методів прогнозування азотного обміну пов’язують із використанням сенсорних технологій, які дозволяють безперервно контролювати фізіологічні показники тварин. Використання біосенсорів та автоматизованих систем аналізу молока створює можливості для раннього виявлення метаболічних порушень та підвищення ефективності управління молочними стадами [20, 38].

Таким чином, використання аналітичних і математичних моделей у поєднанні з показниками азоту сечовини молока створює основу для точного прогнозування, оптимізації годівлі та сталого управління молочними стадами.

У цілому узагальнено наявні дані щодо біологічної ролі сечовини як індикатора збалансованості годівлі та ефективності азотного обміну, а також ролі рубцевої мікробіоти у цих процесах. Розглянуто взаємозв’язок показників BUN, MUN, UUN з основними компонентами молока та їхній вплив на продуктивні й фізіологічні показники тварин.

Разом із тим, недостатньо вивченими залишаються напрями, пов’язані з використанням цих показників в управлінні молочним стадом, у програмах відбору та генетичної оцінки, а також у екологічній та економічній оцінці виробничої діяльності. Для господарств, що займаються молочним скотарством в Україні, такі розробки становлять практичний інтерес і можуть слугувати основою для подальших фундаментальних досліджень.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Схема проведення досліджень

При виконанні експериментальних досліджень, приведених в роботі, всі маніпуляції з коровами, задіяними в дослідженнях, проводили з урахуванням основних принципів біоетики, відповідно до Статті 26 Закону України No. 3447 «Про захист тварин від жорстокого поводження» (2006), Європейської Конвенції про захист хребетних тварин, які використовуються для експериментальних та інших наукових цілей (1986) та Порядку проведення науковими установами дослідів, експериментів на тваринах (2012) [30, 141, 142].

Дослідження реалізовані за двома напрямами:

1- *Біохімічний блок*, включав **аналіз продуктивних ознак** (вміст жиру, білка, лактози, надій, жива маса, енергетична цінність молока та **біохімічний аналіз крові**: білірубін загальний; білірубін «прямий», сечовина (MU), креатинін, глюкоза, альбумін, АЛТ, АСТ, ГГТ (рис. 1).

2. *Виробничий блок*- передбачав перевірку надійності запропонованих предикторів з аналізом **продуктивних ознаки:** вміст жиру, білка, лактози, надій, жива маса, енергетична цінність молока, рівень відтворення, а також **біохімічний аналіз** рівня азоту сечовини молока (MUN), з подальшим визначенням ефективності використання азоту (MNE) коровами.

2.2. Умови та методика проведення першої серії досліджень

У першій серії дослідження проведені в умовах фермерського господарства «Григорович С.А.» Київської області в зимовий період 2022-2023 років на коровах комбінованої Симентальської, молочної Української червоно-рябої й Української чорно-рябої порід. Українська червоно-ряба молочна, створена шляхом комбінаційного схрещування симентальської породи з айрширською, монбельярдською та голштинскою, а Українська чорно-ряба молочна – на основі схрещування місцевої чорно- рябої з голштинською (рис.1). Кожна з груп тварин у

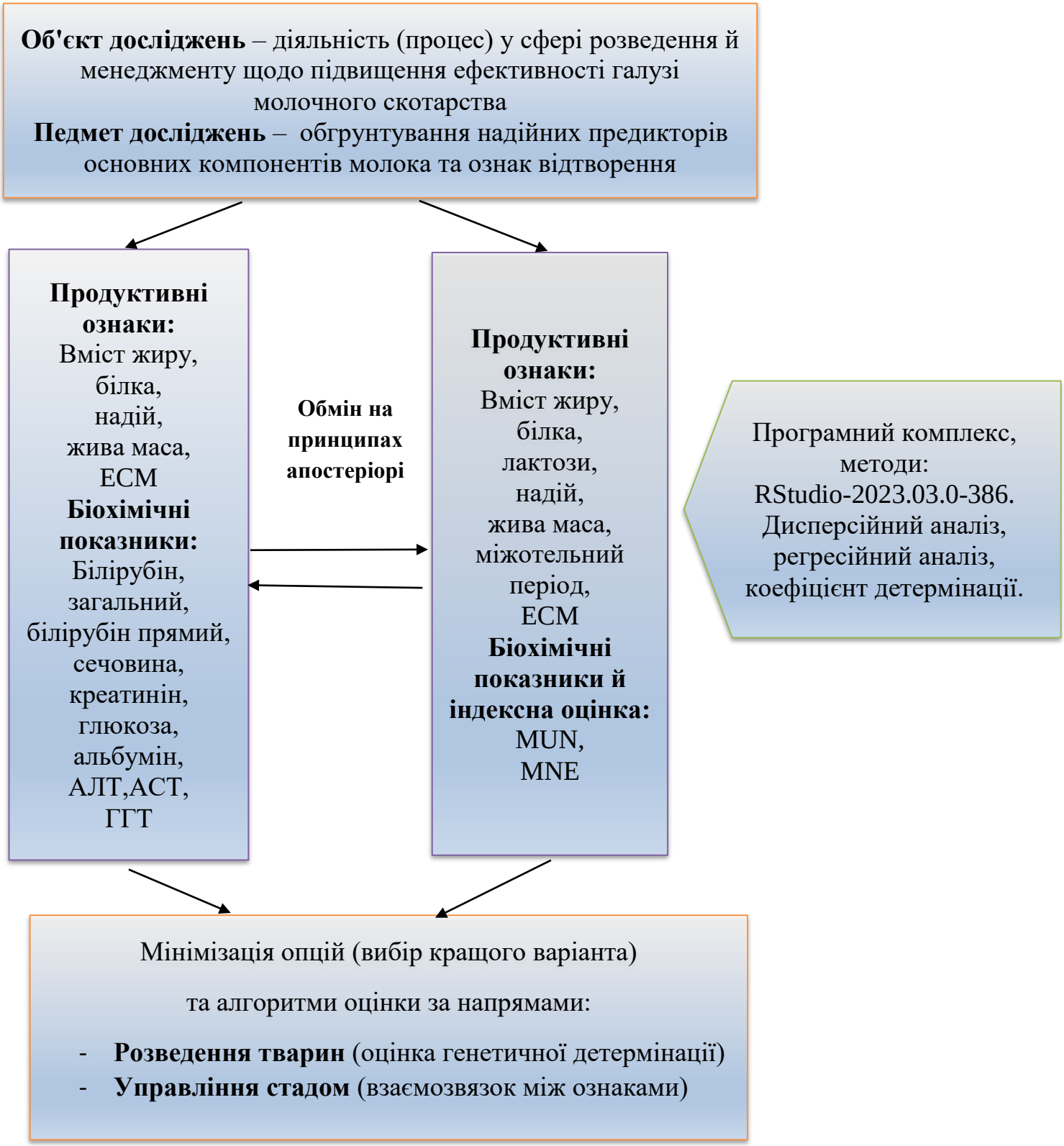

Рисунок 1. **Блок-схема проведення досліджень з оцінки впливу генетичних та паратипових факторів на якісні показники молока**

досліді нараховувала по 33 голови в кожній. Автоматизоване доїння відбувалось двічі на день. Добовий загальнозмішаний раціон корів складався з кормових компонентів таких як: сінаж люцерновий – 3,3 кг; силос кукурудзяний – 21 кг; комбікорм – 9,7 кг; сінаж злакових трав – 5,5 кг; жом буряковий – 3 кг; кукурудза плющена – 2,5 кг, солома – 0,5 кг; вітамінні та мінеральні добавки. Рівень споживання сухої речовини корму був в межах 21,5 кг при вмісті 15% сирого протеїну, 17% кислотно-детергентної клітковини та 26 % нейтрально-детергентної клітковини.

Аналіз біохімічних показників сироватки крові вимірювали на автоматичному біохімічному аналізаторі HTI BioChem FC-120 (High Technology, Inc., США) з використанням реагентів цієї компанії в умовах Навчально-наукової лабораторії ветеринарно-діагностичних досліджень факультету ветеринарної медицини Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Контроль молочної продуктивності (рівень надоїв, вміст жиру та білка) проводили згідно вимог ICAR (n.d.). Значення ECM - Energy-corrected milk або надій скоригований за вмістом жиру та білка в молоці проводили по формулі (1):

$$ECM = (\text{молочний жир, кг} \times 38{,}3 + \text{молочний білок, кг} \times 24{,}3 + \text{молочна продуктивність} \times 0{,}7832)/3{,}14 \quad (1)$$

Дисперсійний аналіз впливу породи, місяця лактації й місяця тільності на досліджувані ознаки корів проводився з використанням лінійної моделі (2):

$$y_{ijk} = a_i + b_j + c_k + e_{ijk} \quad (2)$$

де y_{ijk} – досліджувана ознака, a_i – ефект і-ї породи; b_j – ефект j- го місяця лактації; c_k – ефект k- го місяця тільності; e_{ijk} – залишок.

Ступінь впливу факторів на досліджувані ознаки м`ясної худоби розраховувався по співвідношенню дисперсій за формулою (3):

$$\eta 2 = (SSA/SSD)\ 100\% \quad (3)$$

де SSA – сума квадратів відхилень, обумовлена впливом фактора А; SSD – загальна сума квадратів відхилень.

Статистичний аналіз (описова статистика, дисперсійний аналіз та кореляційний аналіз) проводився з використанням програми RStudio. В якості основних біохімічних характеристик були обрані:

- загальний білірубін – продукт розпаду гемоглобіну (еритроцитів), міоглобіну і цитохромів у вигляді фракцій прямого (зв’язаного, кон’югованого) і непрямого (вільного, незв’язаного або некон’югованого), як індикатор діагностики захворювань печінки;
- прямий білірубін – як чутливий маркер патології печінки, забезпечуючий з’єднання у гепатоцитах (клітинах печінки) загального білірубіну з глюкуроновою кислотою (малотоксична фракція загального білірубіну);
- сечовина - кінцевий продукт розпаду білків і амінокислот, на яку приходиться більше 50% залишкового азоту в організмі;
- креатинін є кінцевим продуктом білкового обміну та забезпечує м'язи енергією а рівень креатиніну в крові безпосередньо залежить від ваги і м'язового обсягу;
- аланінамінотрансфераза (АЛТ) — фермент, який присутній головним чином в клітинах печінки і нирок та в помітно менших кількостях в клітинах серця і м'язів;
- аспартатамінотрансфераза (АСТ) — фермент, який знаходиться у всіх клітинах організму, а головним чином в печінці;
- гамма-глутамілтрансфераза (ГГТ) — фермент, який знаходиться в клітинах печінки і жовчовивідних шляхах і є каталізатором певних біохімічний реакцій;

- глюкоза – аналіз концентрації глюкози в крові вважається корисним інструментом для оперативної діагностики та диференціації прояву кетозу;
- альбуміни- їх баланс необхідний для запобігання втрати рідини кровоносними судинами. Нормальні рівні загального білка, альбуміну та глобуліну становили 6,70-9,40 г/дл, 2,87-4,29 г/дл, і 3,03-5,73 мг/л відповідно;
- загальний білок – показує концентрацію білків в плазмі крові, який складається з трьох основних груп компонентів: альбуміну, глобулінів і фібриногену.

Відбір проб крові для послідуючого аналізу здійснювався через дві години після годівлі.

2.3. Умови та методика проведення другої серії досліджень

Мета другого етапу роботи полягала у визначенні впливу генетичних (походження корів за батьком) та паратипових (рік-місяць отелення) факторів на молочну продуктивність, якісні показники молока, концентрацію азоту сечовини молока, та ефективності азоту молока у корів голштинської породи. Матеріалом для досліджень слугували дані молочної продуктивності 595 корів Голштинської породи в умовах Товариства з обмеженою відповідальністю «Агрофірма «Колос» Київської області (Україна). Дослідження проводились в період із грудня 2024 по серпень 2025 року. В господарстві використовували прив’язну систему утримання з доїнням в молокопровід. Доїння було трьохразове при обслуговуванні одним дояром до 50 корів. Годівля здійснювалась із використанням загальнозмішаного раціону (TMR), характеристика якого представлена в таблицях 2, 3.

Співвідношення NFC/CP важливе, оскільки воно впливає на виробництво молока, особливо молочного білка, і може зумовлювати ризики з здоров’ям та відтворенням корів. Збалансоване співвідношення NFC/CP, коливається від 2,15 до 3,60, що зазвичай бажане для підтримки оптимального рівня азоту сечовини (MUN) у молоці (https://www.thebullvine.com/tag/nfc-cp-ratio/, 2025).

Таблиця 1

Характеристика TMR суміші корів Голштинської породи

Інгредієнти раціону	Вага, кг		Відсоток	
	фізична	по сухій речовині	по фізичній вазі	по сухій речовині
Силос кукурудзяний	28,000	9,240	49,36	37,55
Зернова суміш	8,722	7,967	15,38	32,37
Пивна дробина (волога)	5,000	0,924	8,81	3,76
Сінаж люцерни	3,500	1,838	6,17	7,47
Жом	4,000	0,560	7,05	2,28
Зерно кукурудзи підвищеної вологості	2,200	1,541	3,88	6,26
Шрот соняшниковий	1,500	1,385	2,64	5,63
Солома	0,800	0,703	1,41	2,86
Вода	2,000	0,001	3,53	
Меляса бурякова	1,000	0,450	1,76	1,83
Разом	56,722	24,6	100	43,4

Примітка: суміш розрахована для ваги корів 550-650 кг, надою 28-30 кг, вмісту жиру 4,00%, вмісту білка 3,40%, рівня лактози 4,68%

Джерело: за результатами хімічного аналізу компанії АВМ від 25.04.2025

Таблиця 2

Біохімічна характеристика TMR дійних корів

Компонент	Вміст по сухій речовини, %	Вміст, г
СР*	15,8380	3 897,6920
NDF**	28,9485	7 124,1460
NDF фуража**	20,4421	5 030,7430
ADF***	19,4119	4 777,2170
Цукор	6,1480	1 513,0130
Крохмаль	26,0718	6 416,2060
Розчинна клітковина	7,9292	1 951,3560
Зола	7,6352	1 879,0090
Ca	0,6520-	160,4592

P	0,3987	98,1302
Mg	0,4370	107,5504
K	1,1080	272,6834
Фураж	47,8724	-
Концентрат	52,1276	-
Загальні вуглеводи	73,1534	18 002,8800
Аміак	0,4838	119,0553
NFC/CP****	2,03	-

Примітки: *CP- чистий протеїн (від англ. Crude protein); **NDF- Нейтрально-детергентна клітковина (від англ. Neutral detergent fiber); ***ADF- Кислотно-детергентна клітковина (від англ. Acid detergent fiber); **** NFC/CP співвідношення неклітинних вуглеводів (NFC) до сирого протеїну (CP) у раціоні
Джерело: за результатами хімічного аналізу компанії АВМ від 25.04.2025

Згідно з загально прийнятих норм, рівень неструктурних вуглеводів – NFC (від англ. non-fiber carbohydrates) у загально змішаних раціонах – TMR (від англ. Total Mixed Rations) визначалось шляхом віднімання рівня цих компонентів у відсотках по сухій речовині у TMR від 100%. При цьому NFC включає крохмаль, цукор та пектин, а їх визначення базувалось на розрахунку решти відсотків після врахування рівня клітковини, білка, жиру та золи.

Для оцінки ефективності використання азоту при виробництві молока використано модель (4) за P. Huhtanen et al. [45], яка розроблена на основі залишкової дисперсії, для опису багатофакторної нестабільності (MNE) виробничих даних, та найбільш точно відображає даний процес:

$$MNE\ (\text{г/кг}) = 238 + 7{,}0 \times (MY\ \text{кг/день}) - 0{,}064 \times (MY2) - 2{,}7 \times (MUN\ \text{мг/дл}) - 0{,}10 \times (W) \quad (4)$$

де MY - молочна продуктивність, кг; MUN - рівень азоту сечовини молока, мг/дл; W - вага корови, кг

При цьому MNE (англ. milk nitrogen efficiency) розглядається як показник ефективності використання азоту поступаючого з кормом для виробництва молока в порівнянні с значенням рівня азоту сечовини молока (MUN)

Аналіз якісних та біохімічних показників молока визначали на ультразвуковому аналізаторі «EKOMILK Bond» (Болгарія). Кількість сечовини в молоці визначали діацетил-монооксимним методом. Про її рівень судили за вмістом червоного комплексу, утвореного сечовиною з діацетилмонооксимом у кислому середовищі в присутності тіосемікарбозіда й тривалентного заліза за методикою [66]. Молярну концентрацію сечовини (С) в значені ммоль/л визначали за отриманими даними оптичної густини досліджуваної проби А відносно стандарту В за формулою (5):

$$C = 8{,}33\frac{A}{B}. \quad (5)$$

Надій, скорегований на енергію (Energy Corrected Milk, ECM), розраховували за підходом M. Hall [39] по формулі (1):

Статистичний аналіз (описова статистика, дисперсійний аналіз, кореляційний та регресійний аналіз) проводився з використанням програми RStudio-2023.03.0-386. Так впливу року-місяця отелення, плідника (батька) і номеру лактації проводили з використанням лінійної моделі (2):

Для вивчення взаємозв'язку між залежною змінною (результатом) та однією або декількома незалежними змінними (факторами) використано класичне рівняння регресії (6):

$$y = a + bx + e \quad (6)$$

де а- вільний член моделі;

b-коефіцієнт регресії;

x-змінна величина;

e-похибка

Дисперсійний аналіз впливу року-місяця отелення, бугая-плідника (батька) і номеру лактації на ефективність використання азоту раціону для виробництва молока (MNE) проводився з використанням лінійної моделі (7):

$$yij = ai + bj + ck + eij \quad (7)$$

де y_{ij} – ефективність використання азоту раціону для виробництва молока (MNE); a_i - ефект і–го року-місяця отелення;

b_j - ефект j– го бугая-плідника (батька);

c_k – ефект k- го номеру лактації;

e_{ij} - залишок.

Ступінь впливу факторів на досліджувані ознаки м`ясної худоби розраховувалась за формулою (3):

Відповідно до DSTU 3662:2018 [140], в аналіз молока було додатково включено: 1) сухий знежирений молочний залишок (СЗМЗ) – або суха маса молока, що залишається після вилучення жиру та складається з білків, лактози та мінеральних речовин. Коливання СЗМЗ може бути від 8,0 до 9,5%, й часто використовується як показник якості молока та для розрахунку по вмісту сухих речовин; 2) точка замерзання молока (°C), температура при якій воно починає кришитися, в середньому становить -0,540 °C до -0,570 °C, а для вищого, першого та екстра ґатунків -0,520 °C; 3) вміст лактози- відіграє важливу роль у виробництві молочних продуктів, становить близько 5 г на 100 мл або 4,6-5,2%; 4) pH молока яке зазвичай знаходиться в діапазоні 6,5-6,7, що свідчить про слабке кислотне середовище. Зниження pH нижче 6,5 може вказувати на проблеми зі здоров’ям, а підвищення pH

– на rumen alkalosis, тобто порушення травлення, яке характеризується порушенням обміну речовин, функції печінки та інших органів. У рубці формується лужне середовище при концентрації аміаку більше 16,1 мг%, що призводить до зменшення кількості мікроорганізмів та зниження їх активності. Загальний білок у крові при цьому зростає до 113 г/л, а резервна лужність крові та pH молока та сечі збільшується; 5) титрована кислотність молока, або градуси Тернера (Т) – кількість мілілітрів 0,1 М розчину лугу, яка необхідна для нейтралізації кислот в 100 мл молока. Титрована кислотність свіжовидоєного молока становить 16-18°Т при допустимому значенні 15,99-20,99°Т.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВЛАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Вплив породного фактору на рівень сечовини та біохімічні показники крові в молочному скотарстві

Рівень сечовини та інших біохімічних показників крові корів є інформативним індикатором вуглеводно-білкового балансу, що відображає його вплив на відтворювальну здатність, стан здоров'я тварин, ефективність використання кормів та інтенсивність утворення метану. У зв'язку з цим загальну характеристику досліджуваних груп корів за стандартну лактацію (305 днів) та основні біохімічні показники крові на момент проведення досліду наведено в табл.3.

Таблиця 3

Загальна характеристика досліджуваних груп корів за стандартну лактацію (305 днів) і біохімічні показники крові на момент проведення досліду

Показник	Порода		
	Симентальська (n=33)	Українська червоно-ряба молочна (n=33)	Українська чорно-ряба молочна (n=34)
Надій за 305 лактації	4359,7±39,15	7320,9±47,24	8617,1±85,96
Вміст у молоці жиру, %	4,30±0,059	3,82±0,443	3,48±0,043
Вміст у молоці білка, %	3,29±0,019	3,28±0,014	3,25±0,025
ЕСМ[1], кг	4487,8±65,40	7094,5±296,86	7969,2±109,11
Білірубін загальний, мкмоль/л	6,12±0,749	3,43±0,160	2,75±0,157
Білірубін прямий, мкмоль/л	1,67±0,096	1,74±0,101	1,39±0,075
Сечовина, ммоль/л	2,91±0,046	3,41±0,058	3,06±0,047
Креатинін, мкмоль/л	86,54±1,699	111,16±2,436	86,31±2,016
АЛТ[2], од/л	37,16±0,625	34,81±1,012	33,44±0,697
АСТ[3], од/л	34,24±3,344	48,39±1,900	18,43±1,251
Глюкоза, ммоль/л	2,59±0,079	2,83±0,077	2,74±0,096
Альбумін, г/л	31,30±0,241	34,45±0,473	31,67±0,222
Загальний білок, г/л	67,46±0,743	72,02±1,247	72,12±0,917
ГГТ[4], од/л	13,22±0,424	16,15±1,096	15,04±1,005

Примітки: ЕСМ[1] – надій скоригований за вмістом жиру та білка в молоці; АЛТ[2] – аланінамінотрансфераза; АСТ[3] – аспартатамінотрансфераза; ГГТ[4] – гамма-глутамілтрансфераза

Загальні результати впливу такого перемінного фактору як порода представлено в табл. 4.

Таблиця. 4

Вплив фактору «порода» на основні продуктивні показники

Фактор, показник	Середній квадрат	F-критерій Фішера	η^2, %
Вміст жиру	18,132	8,089*	14,6
ECM	95921886,182	49,790*	51,2

Примітка: ECM – загальна енергетична цінність молока; *$p \leq 0,05$

Породній фактор зіграв значну роль, за впливом на ознаки вмісту жиру в молоці та ECM, значення яких відповідно склали 14,6 та 51,2% (табл.4). Суттєві розбіжності в даних продуктивності між комбінованою Симентальською, молочною українською червоно-рябою та чорно-рябою породами визвано їх виробничою спрямованістю, що вплинуло на особливості травлення в цілому, а особливо травлення азоту.

Для точного опису особливостей травлення азоту, поглинання засвоєння та метаболізму обміну речовин, рівня сечовини, а також ефективності утилізації азоту і максимізації прибутку M. Meng *et al.* [78] рекомендують використовувати «модель корови Моллі» (рис.2).

За P. Gregorini *et al*. [34] дана модель відноситься до класу детермінованої, механістичної, динамічної моделі, що представляє травлення, метаболізм і виробництво продукції дійною коровою на основі математичних рівнянь. Автори співставили прогнози ентерального (в умовах проходження кормового субстрату через весь шлунково-кишковий тракт) виробництва метану з вихідною математичною версією Моллі (Molly Origin) і двома оновленими на основі ряду біохімічних та генетичних показників, що відповідає схемі даного експерименту. Так ці версії включали вплив рубцевої клітковини, параметри травлення та гормональні параметри (Molly84) з переглянутою версією травних та румінальних параметрів (Molly85).

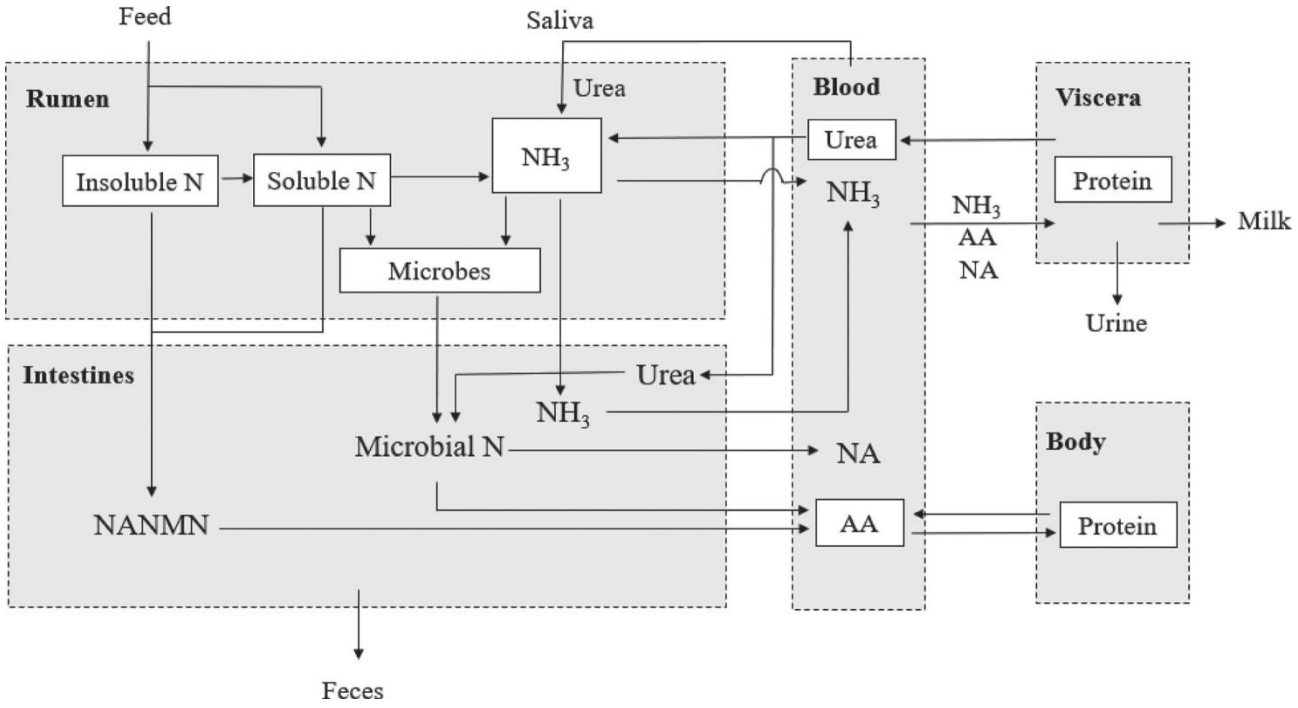

Рисунок 2. **Концептуальна схема метаболізму азоту у жуйних – «модель Моллі»** NANMN - nonammonia, nonmicrobial nitrogen - неаміачний, немікробний азот; NA - nucleic acids - нуклеїнові кислоти; AA- amino acids-аміно кислоти; N- азот; NH_3 - нітрит водню (аміак); Feed- корми; Rumen- рубець; Intestines- кишечник; Saliva- слина; Blood- кров; Viscera- внутрішні органи; Body-тіло; Fecec- фекалії. Затемнені зони представляють органи та тканини де відбуваються біохімічні процеси а стрілками позначено напрями руху цих процесів.
Джерело: M**.** Meng *et al.* [78]

Частково ця модель використана для пояснення впливу генетичних (породна належність), та організованих факторів (місяць лактації, місяць тільності) результати яких наведено в табл.5.

Таблиця. 5

Вплив породи, місяця лактації й місяця тільності

на досліджувані ознаки крові корів

Фактор, показник	Сума квадратів відхилень	Число ступенів свободи	Середній квадрат відхилень	F-критерій Фішера	η^2, %
Білірубін загальний, мкмоль/л					
Порода	212,0	2	106,02	**15,566***	**24,7**
Місяць лактації	56,6	7	8,09	1,187	6,6
Місяць тільності	24,9	6	4,15	0,610	2,9
Залишок	565,3	83	6,81		

Білірубін прямий, мкмоль/л					
Порода	2,261	2	1,1303	**3,857***	**7,7**
Місяць лактації	0,507	7	0,0725	0,247	1,7
Місяць тільності	2,086	6	0,3477	1,187	7,1
Залишок	24.324	83	0.2931		
Сечовина, ммоль/л					
Порода	4,060	2	2,0300	**25,506***	**33,2**
Місяць лактації	0,950	7	0,1357	1,704	7,8
Місяць тільності	0,625	6	0,1042	1,310	5,1
Залишок	6,606	83	0,0796		
Креатинін, мкмоль/л					
Порода	13632	2	6816	**57.393***	**49,8**
Місяць лактації	1719	7	246	2.068	6,3
Місяць тільності	2167	6	361	3.041*	7,9
Залишок	9857	83	119		
АЛТ, Од/л					
Порода	236,1	2	118,06	**5,569***	**10,4**
Місяць лактації	157,3	7	22,47	1,060	6,9
Місяць тільності	120,2	6	20,04	0,945	5,3
Залишок	1759,6	83	21,20		
АСТ, Од/л					
Порода	14964	2	7482	**38,432***	**46,3**
Місяць лактації	578	7	83	0,424	1,8
Місяць тільності	618	6	103	0,529	1,9
Залишок	16158	83	195		
Глюкоза, ммоль/л					
Порода	0,811	2	0,4054	1,713	0,004
Місяць лактації	0,742	7	0,1061	0,448	0,004
Місяць тільності	2,386	6	0,3977	1,680	0,01
Залишок	19,646	83	0,2367		
Альбумін, г/л					
Порода	191,34	2	95,67	**28,461***	**35,1**
Місяць лактації	36,48	7	5,21	1,550	6,7
Місяць тільності	37,63	6	6,27	1,866	6,9
Залишок	279,00	83	3,36		
Загальний білок, г/л					
Порода	479,7	2	239,87	**7,809***	**13,2**
Місяць лактації	514,8	7	73,54	2,394*	14,2
Місяць тільності	86,7	6	14,45	0,470	2,4
Залишок	2549,7	83	30,72		
ГГТ Од/л					
Порода	135,8	2	67,90	1,855	3,5
Місяць лактації	246,2	7	35,18	0,961	6,3
Місяць тільності	504,9	6	84,16	**2,298***	**12,9**
Залишок	3039,0	83	36,61		

Примітка: *$p \leq 0,05$

Аналіз впливу генетичних (порода), та не негенетичних (місяць лактації, місяць тільності) довів, що вірогідний вплив фактору породи відзначено за такими біохімічними показниками крові, як рівень загального білірубіну 24,7%, сечовини 33,2%, креатиніну 49,8%, аланінамінотрансферази (АЛТ) 10,4%, аспартатамінотрансферази (АСТ) 46,3%, альбуміну 35,1% та загального білка 13.2% (табл.5). Вплив фактору «порода» мав достовірний вплив за рахунок контрастних показників продуктивності між порівнюваними групами за весь період лактації (табл. 4), яка була реалізована в однакових умовах годівлі та здійснювалась за принципом «без обмежень».

За даними Новозеландського сайту з розведення худоби DairyNZ (2023), який орієнтований на фермерів, констатується, що молочна сечовина «вказує» на рівень сирого протеїну у раціоні корови, який утворюється в результаті метаболізму амінокислот і білка організму. Якщо дієта корови багата білком, вона може виробляти більше сечовини, яка зазвичай виділяється з сечею та молоком. З іншого боку, коли в раціоні не вистачає азоту, організм корови перенаправляє сечовину назад у рубець. Зазначено, що рівні сечовини в молоці відрізняються на ранній, середній і пізній фазах лактації.

Таблиця 6

Рекомендовані харчові потреби корів в сирому білку (CP) та рівні MUN на різних етапах лактації

Показники	Рання лактація	Середина лактації	Пізня лактація
Мінімальний CP*% у раціоні	18	16	14
Приблизний MU (мг/дл)	25-40	25-30	20-25

Примітки: * сирий протеїн
Джерело: DairyNZ (2023).

В умовах пасовищних систем Нової Зеландії рівні MUN вищі, ніж там, де корів годують загальним змішаним раціоном (тобто США, Західна Європа, умови

проведення даного досліду). Це пов'язано з високою кількістю сирого протеїну (близько 20, а інколи і 30 мг/дл) який отримує корова на якісних пасовищах, долаючи великі відстані. Інші фактори включають споживання води, стан корови, стадію лактації, сезон, генетику, частоту доїння, здоров'я рубця та функцію печінки. Для оцінки ступеню зв'язку між біохімічними показниками наведено дані табл. 7.

Таблиця 7

Матриця коефіцієнтів кореляції між біохімічними показниками крові корів (загальна вибірка-100 корів)

Показники	Білірубін загальний, мкмоль/л	Білірубін прямий, мкмоль/л	Сечовина, ммоль/л	Креатинін, мкмоль/л	АЛТ, Од/л	АСТ, Од/л	Глюкоза, ммоль/л	Альбумін, г/л	Загальний білок, г/л
Білірубін загальний	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
Білірубін прямий	0,336±0,001*	1,00	–	–	–	–	–	–	–
Сечовина	0,171±0,091	0,111±0,272	1,00	–	–	–	–	–	–
Креатинін	0,089±0,384	0,103±0,306	**0,552±0,000***	1,00	–	–	–	–	–
АЛТ,	0,114±0,263	0,183±0,068	**0,229±0,022***	0,008±0,937	1,00	–	–	–	–
АСТ	0,333±0,001*	0,238±0,017*	0,182±0,071	0,457±0,000*	0,144±0,152	1,00	–	–	–
Глюкоза	0,021±0,838	0,301±0,002*	0,098±0,331	0,110±0,276	0,129±0,200	0,001±0,996	1,00	–	–
Альбумін	0,140±0,168	0,002±0,986	**0,454±0,000***	0,744±0,000*	0,112±0,268	0,368±0,000*	0,211±0,035*	1,00	–
Загальний білок	0,152±0,133	0,126±0,211	**0,234±0,019***	0,024±0,812	0,548±0,000*	0,016±0,873	0,005±0,958	0,064±0,527	1,00
ГГТ	0,192±0,058	0,048±0,637	0,125±0,217	0,053±0,604	0,108±0,286	0,184±0,069	0,149±0,141	0,086±0,397	0,189±0,061

Примітки: ступінь значущості де *$p \leq 0,05$

Встановлена кореляційна залежність між концентраціями сечовини, яка є основним азотистим кінцевим продуктом катаболізму білків і амінокислот і креатиніном – продуктом розпаду креатинфосфату в м'язах, включаючи корів Симентальської, Української червоно-рябої молочної, Української чорно-рябої молочної порід (табл.7). Загальний коефіцієнт кореляції для сечовини плазми крові та креатиніну становить 0,552, що показує позитивний зв'язок зі значенням m_r = 0,000 ($p \leq 0,01$), що свідчить про підвищення рівня креатиніну в плазмі крові досліджуваних груп корів при зростанні значення сечовини і, навпаки. Як і в роботі M. Edvardsson *et al.* [29], встановлена позитивна кореляційна залежність між креатиніном та аспартатамінотрансферазою, що характеризує функціональний стан печінки, а також альбуміном у плазмі крові досліджуваних груп тварин. Загальний коефіцієнт кореляції становить 0,457 і 0,744 відповідно, зі значенням $m_r = 0,000$ ($p \leq 0,01$) і узгоджується зі зміною рівня цих показників у кожній з досліджуваних груп корів. Негативна кореляційна залежність спостерігається між концентрацією сечовини й рівнем аланінамінотрансферази в плазмі крові корів з коефіцієнтом кореляції r=0, 229, m=0,022 ($p \leq 0,05$). Загальний коефіцієнт кореляції для сечовини, альбуміну і загального білка плазми крові становить 0,454 зі значенням $m_r = 0,000$ ($p \leq 0,01$) і 0,0234 зі значенням $m_r = 0,019$ ($p \leq 0,05$) відповідно. Виявлена позитивна кореляційна залежність між концентрацією білірубіна прямого, який є ендогенним антиоксидантом [69] і рівнем глюкози й АСТ у крові досліджуваних груп корів, коефіцієнт кореляції яких становить 0,301 зі значенням m = 0,002 ($p \leq 0,01$) і 0,238 зі значенням m_r= 0,017 ($p \leq 0,05$). Значення коефіцієнтів кореляції узгоджуються зі зміною рівня показників у кожній з досліджуваних груп корів (табл. 3).

Таким чином породній фактор вносить суттєві розбіжності в широкий комплекс біохімічних показників, що може бути використано для цілеспрямованих програм відбору та досягнення позитивних результатів в покращені як стану здоров'я так ш зменшення рівня метаногенезу у жуйних. Як надмірно високі, так і

низькі значення BUN та MUN є небажаними для молочних корів через їхній негативний вплив на репродуктивну продуктивність, здоров'я та ефективність використання азоту (рис.3).

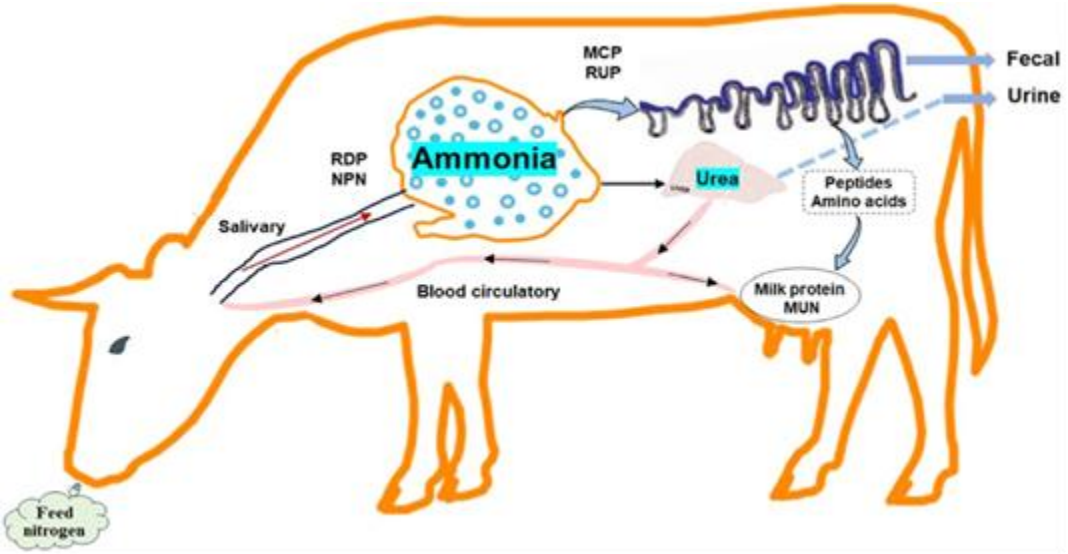

Рисунок 3. **Процес азотистого обміну великої рогатої худоби**
RDP - білок, що розкладається в рубці; RUP - білок, що не розкладається в рубці; MCP - мікробний білок; NPN - небілковий азот; MUN - азот сечовини молока; Ammonia – аміак.
Джерело: X. Zhao *et al*. [139]

Проведені дослідження показують, що MUN як і BUN є ознакою з низьким або помірним успадкуванням і позитивно корелює з виділенням азоту. За даними X. Zhao *et al.* [139], все ще існують неузгодженості щодо відбору корів з низьким значенням MUN, який може ефективно зменшити виділення азоту та вплинути на інші економічні параметри молочних корів, а також зменшити викиди азоту. Крім того раніше доведено, що зміни показників крові можуть залежати від реакції організму на вплив ксенобіотиків, в залежності від генотипу зокрема за генами ферментів печінки, що спостерігалось як на тваринах, так й в медичній практиці. Отже, аналіз кореляційних зв'язків між біохімічними показниками крові у корів різних порід дозволяє стверджувати про існування породної специфіки метаболічних

процесів, що слід враховувати при розробці програм селекції та технологій вирощування тварин.

Таким чинок, за результатами проведених досліджень встановлено суттєвий значущий вплив породного фактору (Симентальська, Українська червоно-ряба молочна та Українська чорно-ряба молочна породи), на вміст жиру в молоці (14,6%) загальну енергетичну цінність молока (51,2 %), рівень сечовини (33,2%) та біохімічні показники крові. Породна належність або фактор породи має вірогідний вплив за такими біохімічними показниками крові як рівень загального білірубіну (24,7%), сечовини (33,2%), креатиніну (49,8%), аланінамінотрансферази (АЛТ) (10,4%), аспартатамінотрансферази (АСТ) (46,3%), альбуміну (35,1%) та загального білка (13.2%). Така залежність вказує на можливості використання цих показників в програмах відбору спрямованих на зменшення викидів азоту та використання певних біохімічних індикаторів для контроля стану здоров'я та добробуту тварин.

Встановлена кореляційна залежність між концентраціями сечовини і креатиніном у плазмі крові досліджуваних груп тварин. Загальний коефіцієнт кореляції для сечовини плазми крові та креатиніну свідчить про підвищення рівня креатиніну в плазмі крові досліджуваних груп корів при зростанні значення сечовини і, навпаки. Позитивна кореляційна залежність спостерігається між креатиніном і аспартатамінотрансферазою, а також альбуміном у плазмі крові досліджуваних груп тварин. Негативна кореляційна залежність спостерігається між концентрацією сечовини й рівнем аланінамінотрансферази в плазмі крові корів. Виявлена позитивна кореляційна залежність між концентрацією білірубіна прямого і рівнем глюкози й АСТ у крові досліджуваних груп корів, та між вмістом сечовини й альбуміну, сечовини й загального білка плазми крові. Значення коефіцієнтів кореляції узгоджуються зі зміною рівня показників по кожній з досліджуваних груп корів - Симентальської, Української червоно-рябої молочної, Української чорно-рябої молочної порід.

З метою коректного опису особливостей травлення жуйних, засвоєння та метаболізму кормових ресурсів, рівня сечовини та широкого комплексу біохімічних показників крові та молока, необхідно використовувати концептуальну «модель корови Моллі». Побудова за цим принципом експериментів, для оцінки дії широкого комплексу генетичних та організованих (негенетичних) факторів на особливості травлення азоту, відкриває можливості системного погляду на рішення проблем екологічного, економічного та біологічного характеру.

3.2. Аналіз впливу генетичних та паратипових факторів на продуктивні й біохімічні показники молока

Біохімічні показники крові, зокрема рівень сечовини, відображають інтенсивність обмінних процесів та фізіологічний стан корів, формуючи передумови для реалізації їх продуктивного потенціалу. Водночас ці показники перебувають у тісному взаємозв'язку з біохімічним складом і якістю молока, оскільки кров є основним джерелом субстратів для його синтезу в молочній залозі. Незважаючи на наявність численних досліджень, присвячених впливу окремих біохімічних факторів на стан здоров'я тварин, питання породної зумовленості взаємозв'язків між показниками крові та якісними характеристиками молока залишається недостатньо вивченим, що зумовлює актуальність подальшого аналізу.

У таблицях 8 і 9 наведено описову статистику досліджуваних ознак.

Таблиця 8

Описова статистика показників молочної продуктивності та живої маси корів в розрізі стандартних лактацій (n=595)

Ознака	Min	Max	M±m	σ^2	σ	Cv, %
Перша лактація						
Надій за 305 днів лактації, кг	2873	11348	8538,3 ± 90,83	1897643,5	1377,5	16,1
Кількість молочного жиру, кг	143	409	288,9 ± 3,0	2028,8	45,0	15,6
Жива маса корів, кг	396	515	508,3±0,64	284,1	16,8	3,31
Друга лактація						

Надій за 305 днів лактації, кг	3627	12083	8531,9 ± 138,2	3265429,8	1807,0	2162
Кількість молочного жиру, кг	130	436	290,9 ± 4,6	3585,5	59,9	20,6
Жива маса корів, кг	521	532	528,4±0,57	292,3	17,1	3,24
Третя лактація						
Надій за 305 днів лактації, кг	2457	12107	8721,4 ± 175,7	2748815,0	1658,0	19,0
Кількість молочного жиру, кг	134	425	298,7 ± 6,1	3300,5	57,4	19,2
Жива маса корів, кг	532	543	537,1±0,52	298,2	17,3	3,22
Четверта лактація і старше						
Надій за 305 днів лактації, кг	3364	12664	7835,0 ± 274,2	3458656,9	1859,7	23,7
Кількість молочного жиру, кг	168	420	269,0 ± 9,2	3910,0	62,5	23,2
Жива маса корів, кг	541	650	620,3±0,49	311,6	17,6	2,84

За якісними показниками молока досліджувані тварини були об’єднані в загальну вибірку (табл. 9), що дало змогу на основі «змішаної» моделі розрахувати вплив таких факторів як «Рік-місяць отелення», «Бугай-плідник», «Номер лактації». Загальні коливання MUN склали від 2,6 до 32,9 мг/дл з відповідним розділенням на 1-й рівень), 8-11,99 мг/дл; 2) вище оптимального MUN* (2-й рівень), 12-15,99 мг/дл; MUN*(3-й рівень), 16,0 мг/дл і більше. Загальні дані відображають рівень показників молока

Таблиця 9

Описова статистика досліджуваних показників молока (n=595)

Ознака	Min	Max	M±m	σ^2	σ	Cv, %
Добовий надій, кг	10,0	56,0	27,7 ± 0,36	70,2	8,4	30,3
СЗМЗ, %	3,11	10,6	8,74±0,02	0,34	0,58	6,6
Вміст жиру, %	3,17	5,73	4,39±0,08	0,68	0,82	16,7
Вміст білка, %	2,4	4,0	3,40±0,01	0,03	0,17	5,0
Точка замерзання,°С	0,4	0,7	0,58±0,01	0,001	0,03	5,2
Вміст лактози, %	0,5	5,8	4,68±0,01	0,10	0,32	6,8
pH	2,1	7,4	7,09±0,01	0,06	0,24	3,4
Титров. кислотність, Th	1,5	10,5	6,46±0,04	0,75	0,87	13,5
Провідність	3,3	8,4	3,98±0,02	0,15	0,39	9,8
MUN* (1-й рівень), 8-11,99 мг/дл	8,7	11,7	9,90±0,07	1,17	1,08	10,9
MUN* (2-й рівень), 12-15,99 мг/дл	12,6	15,8	13,89±0,10	1,20	1,10	7,9
MUN*(3-й рівень), 16,0 мг/дл і більше	16,4	32,8	21,96±0,39	18,50	4,30	19,6

MUN по всій вибірці	2,6	32,9	12,31±0,24	35,60	5,97	48,5
Жива маса корів, кг	488,0	650,0	526,4±0,75	308,0	17,5	3,3
Надій, скорегований на енергетичний вміст (Energy Corrected Milk, ECM)	10,3	66,6	29,13±0.35	70,0	8,37	28,7

Примітка: *градації MUN (азоту сечовини молока) й чисельність спостережень по групам: 1-й рівень - 217 гол.; 2-й рівень – 120 гол.; 3-й рівень – 122 гол.

Прийняте ранжування груп корів по прояву MUN в певних діапазонах, дало можливість визначити кращі показники рівня відтворення (міжотельний період) по групі з середнім значенням 14,7 місяці (MUN в діапазоні 8-12 мг/дл) (рис.4).

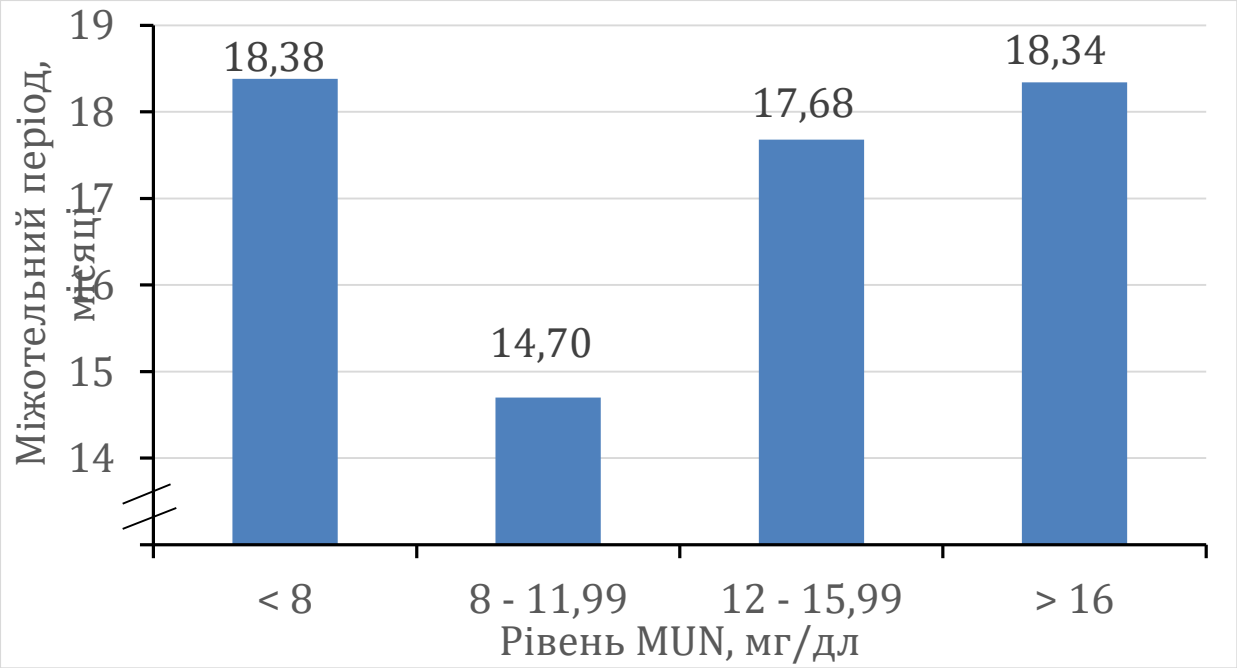

Рисунок 4. **Залежність рівня відтворення корів (міжотельний період) від середніх значень азоту сечовини молока (MUN) впродовж лактації**

Надлишок сечовини (12 мг/дл та більше). зумовлюють критичний стан для репродукції через високий рівень аміаку в крові й сечовини в молоці, та як наслідок змінює pH слизу матки. Ймовірно, це може вплинути на активність сперматозоїдів під час осіменіння або викликати ранню ембріональну смертність. Такий збій веде до перевантаження печінки переробкою аміаку, що знижує рівень прогестерону,

необхідного для підтримки вагітності. В очевидь, це призводить до збільшення перегулів, зниження індексу осіменіння та зростання міжотельного періоду.

Велика кількість факторів впливає на якість молока, що заставляє фахівців знаходити способи такої залежності через розуміння механізмів такого впливу та їх значущість. У таблиці 10 представлені результати дисперсійного аналізу впливу таких сезонних факторів як рік-місяця отелення, та походження дочок за батьком (плідник), який відноситься до генетичного фактору, а також номеру лактації.

Таблиця 10

Вплив року-місяця отелення, плідника (батька корів) і номеру лактації на показники молочної продуктивності та відтворення (n=595)

Фактор, показник	Сума квадратів відхилень	Число ступенів свободи	Середній квадрат відхилень	F-критерій Фішера	η^2, %
Добовий надій					
Рік-місяць отелення	15751	25	630,1	15,424 *	80,7
Бугай	2979	44	67,7	1,657 *	15,3
Номер лактації	779	6	129,8	3,177 *	4,0
Залишок	19975	489	40,8		
Надій за лактацію					
Рік-місяць отелення	378318037	22	17196274	8,509 *	24,5
Бугай	191039506	44	4341807	2,148 *	12,4
Номер лактації	8578626	6	1429771	0,707	0,01
Залишок	968079307	479	2021042		
Вміст жиру в молоці за лактацію					
Рік-місяць отелення	4,260	22	0,19364	49,53 *	66,8
Бугай	0,189	44	0,00430	1,10	3,0
Номер лактації	0,056	6	0,00938	2,40 *	0,9
Залишок	1,873	479	0,00391		
Кількість молочного жиру за лактацію					
Рік-місяць отелення	318450	22	14475	5,988 *	18,5
Бугай	229563	44	5217	2,158 *	13,4
Номер лактації	12340	6	2057	0,851	0,7
Залишок	1157855	479	2417		
Вміст білка в молоці за лактацію					
Рік-місяць отелення	1,0362	22	0,04710	39,351 *	59,8
Бугай	0,0973	44	0,00221	1,847 *	5,6
Номер лактації	0,0249	6	0,00415	3,468 *	1,4
Залишок	0,5733	479	0,00120		
Кількість молочного білка за лактацію					
Рік-місяць	350078	22	15913	7,426 *	22,0

отелення					
Бугай	206319	44	4689	2,188 *	12,9
Номер лактації	10720	6	1787	0,834	0,7
Залишок	1026389	479	2143		
Сервіс-період					
Рік-місяць отелення	8520826	23	370471	141,145 *	86,1
Бугай	130619	42	3110	1,185	1,3
Номер лактації	35538	5	7108	2,708 *	0,4
Залишок	1215259	463	2625		

Примітка: *$p \leq 0,05$

Доведено суттєвий вплив на продуктивні показники таких факторів як рік та місяця отелення практично у всіх випадках (табл. 10). Незважаючи на використання загально змішаного раціону, який був стандартний впродовж календарного року, сезон року суттєво впливав на добовий надій, надій за лактацію, вміст жиру та білка. Походження за батьком корів також мав вірогідний вплив, хоча в більшості випадків значно менший за величиною такого прояву ніж сезонні коливання. Відмічено вплив плідника (батька корови) на надій за лактацію – 12,4%, кількість молочного жиру за лактацію – 13,4%, кількість молочного білка за лактацію – 12,9%. За сезонними коливаннями (рік-місяць отелення) відмічений їхній суттєвий та вірогідний вплив на якісні показники молока (табл. 11), з мінімальним впливом такого генетичного фактору як походження за батьком.

Таблиця 11

Вплив року-місяця отелення, плідника (батька) на якісні показники молока

Фактор	Сума квадратів відхилень	Число ступенів свободи	Середній квадрат відхилень	F-критерій Фішера	η^2, %
Добовий надій					
Рік-місяць отелення	15751	25	630,1	15,444 *	40,7
Бугай	2979	44	67,7	1,659 *	7,7
Залишок	19975	489	40,8		
СЗМЗ					
Рік-місяць отелення	30,33	25	1,2132	3,914 *	0,06
Бугай	7,33	45	0,1630	0,526	0,02
Залишок	160,25	517	0,3100		
Вміст жиру					
Рік-місяць отелення	4,260	22	0.19364	49.524 *	67,4
Бугай	0,189	44	0.00430	1,100	3,0
Залишок	1,873	479	0.00391		
Вміст білка					

Рік-місяць отелення	3,505	25	0,14018	5,488 *	19,4
Бугай	1,032	45	0,02293	0,898	5,7
Залишок	13,206	517	0,02554		
Точка замерзання					
Рік-місяць отелення	0,0631	25	0,0025236	3,578 *	13,7
Бугай	0,0234	45	0,0005196	0,737	5,08
Залишок	0,3647	517	0,0007053		
Вміст лактози					
Рік-місяць отелення	7,09	25	0,28375	2,962 *	11,6
Бугай	3,11	45	0,06910	0,721	5,1
Залишок	49,52	517	0,09579		
Провідність					
Рік-місяць отелення	6,95	25	0,2779	2,113 *	7,9
Бугай	9,33	45	0,2074	1,577 *	10,6
Залишок	68,00	517	0,1315		
pH					
Рік-місяць отелення	14,569	25	0,5827	16,345 *	42,5
Бугай	1,111	45	0,0247	0,693	3,2
Залишок	18,432	517	0,0357		
Титрована кислотність					
Рік-місяць отелення	29,1	25	1,1638	1,588 *	6,5
Бугай	35,1	45	0,7793	1,063	7,8
Залишок	379,0	517	0,7331		
MUN					
Рік-місяць отелення	1982	25	79,28	2,386 *	9,4
Бугай	1601	45	35,57	1,070	7,6
Залишок	17179	517	33,23		

Примітка: *$p \leq 0,05$

Можна констатувати суттєвий вплив таких організованих факторів як незначні зміни годівлі в різні сезони та місяці року та навіть зміни температурного режиму на фермі за різні періоди року. Вплив не генетичних факторів був доволі високим за добовим надоєм, вмістом жиру, білка та лактози, а також MUN. Вплив плідника (походження за батьком) на рівень MUN у дочок невірогідний (η^2, = 7,6%), що вказує на наявність певної тенденції такого впливу. Для оцінки саме генетичної компоненти на ці показники, необхідно, на думку авторів, використовувати не абсолютні значення цих показників, а характер їх зміни за певний період часу в розрізі генетичних груп, пов'язуючи такі зміни з нормою реакції «генотип – середовище».

Система контролю MUN опрацьована в США в компанії DHI (Dairy Herd Improvement), надає молочним фермерам інформацію для управління та покращення свого стада на основі аналізу «вхідних даних» які фіксують особливості годівлі

тварин та якісних показниках молока (рис. 5). Крім того DHI включає збір та аналіз даних про виробництво та якість молока, здоров'я корів та фактори розведенні. Програми DHI часто управляються DHIA (Dairy Herd Improvement Associations).

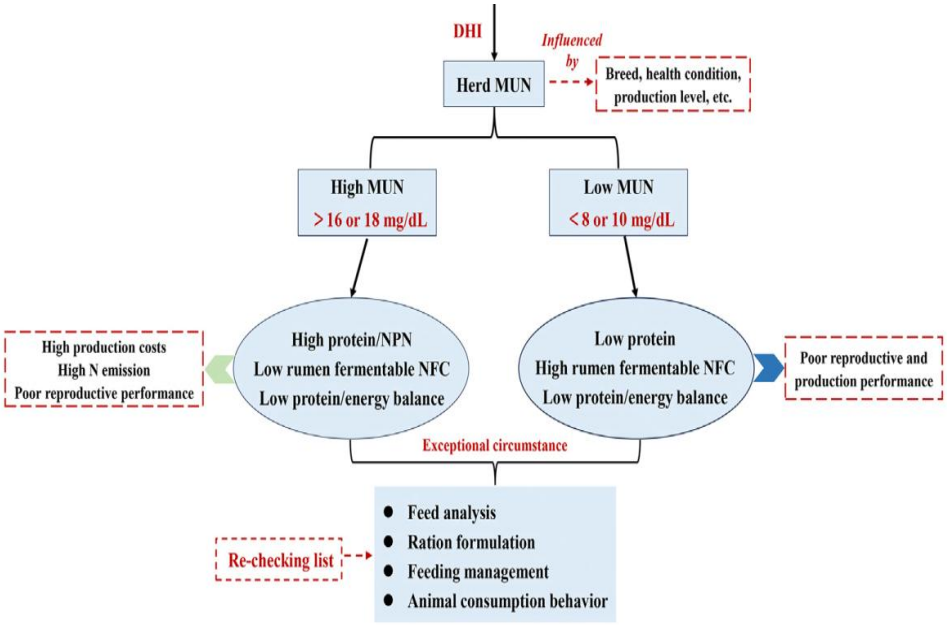

Рисунок 5. **Процес для виявлення причин високої або низької концентрації MUN, який застосовується консалтинговою компанією DHI (Dairy Herd Improvement), США**
MUN – азот сечовини молока; NPN – небілковий азот; NFC – неструктурні вуглеводи
Джерело: X. Zhao *et al*. [138]

За експериментальними даними багатьох авторів, можливі діапазони для MUN здатні ускладнити їхню інтерпретацію, адже деякі дослідники рекомендують діапазон MUN від 10 до 14 мг/дл, а інші – від 8 до 12 мг/дл [103, 105]. Останній діапазон відображає раціони, які розроблені відповідно до потреб корів у білку і мають відмінний баланс білка (16%), білкових фракцій і вуглеводів для уловлювання надлишку аміаку в рубці. Дослідження C. Müller *et al.* [81] показало, що збільшення crude protein у раціоні на одну відсоткову одиницю призвело до збільшення концентрації MUN на 1,04 та 1,24 мг/дл при надоях 40 та 30 кг/день відповідно. Однією

зі стратегій для значущої інтерпретації MUN на конкретному молочному господарстві є оцінка поточного раціону та MUN по всьому стаду з резервуара для зберігання молока. Корисно мати кілька значень MUN для порівняння з конкретним раціоном як базовим. Дві можливі проблемні області – це високі (>12-14 мг/дл) та дуже нестабільні значення MUN. Низькі MUN (<8-10 мг/дл) вказують на можливий дефіцит білка в раціоні, який може виникнути, коли знижується активність бактерій рубця, що обмежує виробництво молока та синтез молочного білка. Високий рівень MUN (>12-14 мг/дл) може бути пов'язаний з надлишком білка в раціоні або дисбалансом білка в рубці, фракцій білка та енергії (неструктурних вуглеводів). Ці фактори також можуть бути пов'язані зі зниженням надоїв молока, вмісту справжнього білка та ефективності годівлі. Високі значення MUN вказують на втрату білка корму та використання коровами більшої кількості енергії для виведення цього зайвого білка через молоко та екскрети, що означає виведення надлишку азоту в навколишнє середовище.

Ключовим фактором є забезпечення достатньої кількості доступних вуглеводів у рубці, щоб задовольнити енергією мікробіоту рубця для перетворення аміаку на мікробний білок. За даними X. Zhao *et al*. [138] контроль MUN служить надійним показником особливостей харчування молочних стад через вплив на репродуктивну функцію, здоров'я та ефективність використання азоту, а сама ефективність використання азоту пов’язана у жуйних з емісією метану (CH_4), вуглекислого газу (CO_2), азоту (N_2), аміаку (NH_4). За даними С. Рубана та ін. [103, 104] молочні корови зазвичай сортують TMR, вибираючи дрібні частки корму проти довших, що призводять до більшого споживання високоферментованих вуглеводів та меншого споживання ефективної клітковини, ніж передбачалося, що впливає на зниження pH рубця та зміни складу молока. Інтегрований показник ECM є комплексним при визначенні бізнесової привабливості молока, адже в цілому зумовлює цінову планку на продукцію за схемою: чим більше ECM тим більша ціна за одиницю продукції.

Враховуючи суттєвий вплив фактору порода на показник енергетичної цінності молока (ECM), нами проведено оцінку можливих змін цього показникf в залежності від рівнів MUN (табл. 12).

Дані таблиці 12 дають змогу виявити зв'язок між ECM та основними компонентами молока, в тому числі при зміні рівня MUN по трьом контрольним групам.

Таблиця 12

Коефіцієнти кореляції між ECM та іншими досліджуваними ознаками (n=595)

Добовий надій	Вміст жиру в молоці	Вміст білка в молоці	Вміст лактози в молоці	Жива маса корів	Вміст азоту сечовини в молоці (MUN)
По всій вибірці (n=567)					
0,9077± 0,0177*	0,1127± 0,0418*	-0,2180± 0,0411*	-0,2172± 0,0411*	-0,0511± 0,0432	-0,0005± 0,0421
При вмісті азоту сечовини в молоці 8-11,99 мг/дл, (n=207)					
0,8926± 0,0315*	0,1412± 0,0691*	-0,3054± 0,0665*	-0,3155± 0,0663*	-0,0461± 0,0423	+0,0134± 0,0698
При вмісті азоту сечовини в молоці 12-15,99 мг/дл, (n=112)					
0,9253± 0,0362*	0,0351± 0,0953	-0,2290± 0,0928*	-0,2395± 0,0926*	-0,0502± 0,0436	+0,1069± 0,0948
при вмісті азоту сечовини в молоці 16 мг/дл і більше (n=248)					
0,9371± 0,0333*	-0,0034± 0,0953	-0,1129± 0,0947	-0,1191± 0,0946	-0,0451± 0,0431	-0,1344± 0,0945

Примітка: *$p \leq 0,05$

Закономірним є вірогідний зв'язок між величиною надою та основними компонентами молока при практичній відсутності зв’язку з MUN (дані по всій вибірці). Надлишок сечовини (при вмісті азоту сечовини в молоці 16 мг/дл і більше), вказує на надлишок азоту в рубці та нестачу енергії для його засвоєння. Таким чином, енергетична цінність молока може знижуватися через меншу ефективність синтезу жиру та білка. Формально це підтверджується від’ємним коефіцієнтом кореляції (–0,1344± 0,0945) між значеннями ECM та MUN. Високий рівень сечовини та низький білка (від’ємний коефіцієнт кореляції –0,1129± 0,0947) свідчить про серйозний дефіцит енергії, що зменшує жирність та загальну поживність молока.

У таблиці 13 представлені результати дисперсійного аналізу впливу року-місяця отелення, походження за батьком і номеру лактації на MNE раціону для виробництва молока.

Таблиця 13

Вплив року-місяця отелення, бугая-плідника (батька) і номеру лактації на MNE раціону для виробництва молока, n = 595

Фактор, показник	Сума квадратів відхилень	Число ступенів свободи	Середній квадрат відхилень	F-критерій Фішера	η^2, %
Рік-місяць отелення	220,2	25	8,81	2,375 *	9,3
Бугай (батько корови)	177,9	45	3,95	1,060	7,5
Номер лактації	42,9	7	6,13	1,652	1,7
Залишок	1908,8	515	3,71		

Примітка: *$p \leq 0,05$

З досліджених факторів лише рік-місяць отелення вірогідно впливав на MNE раціону для виробництва молока. Можна констатувати суттєвий вплив таких організованих факторів як незначні зміни в годівлі в різні сезони та місяці року та навіть зміни температурного режиму на фермі за різні періоди року. Для оцінки саме генетичної компоненти впливу на ці показники необхідно, на думку авторів, використовувати не абсолютні значення цих показників, а характер їхньої зміни за певний період часу в розрізі генетичних груп, пов'язуючи такі зміни з нормою реакції «генотип – середовище».

Значення фенотипічних коефіцієнтів кореляції між добовим надоєм та основними компонентами молока (вміст жиру, білка, лактози), рівнем MUN та MNE для виробництва молока (табл. 14), дали змогу виявити вірогідні залежності.

Так значення MNE для виробництва молока від'ємно корелює з вмістом жиру в молоці, білка в молоці, лактози в молоці, вмісту MUN. Виявлено також позитивний

кореляційний зв'язок між надоєм та MNE для виробництва молока, та від'ємний високо вірогідний між MNE та вмістом MUN.

Таблиця 14

Коефіцієнти фенотипічної кореляції між досліджуваними ознаками, n = 595

Ознаки	Добовий надій	Вміст жиру в молоці	Вміст білка в молоці	Вміст лактози в молоці	Жива маса корів	Вміст MUN	MNE для виробництва молока
Добовий надій	1						
Вміст жиру в молоці	-0,2829± 0,0404*	1					
Вміст білка в молоці	-0,3167± 0,0399*	0,0540± 0,0420	1				
Вміст лактози в молоці	-0,2653± 0,0406*	-0,1167± 0,0418*	0,8105± 0,0246*	1			
Жива маса корів	-0,0400± 0,0421	-0,0648± 0,0421	0,0556± 0,0421	0,0900± 0,0420*	1		
Вміст MUN	0,0502± 0,0420	**-0,0985 0,0419***	-0,0711± 0,0420	-0,0693± 0,0420	-0,0696± 0,0420	1	
MNE для виробництва молока	0,8449± 0,0225*	**-0,1980± 0,0412***	-0,2234± 0,0410*	-0,1719± 0,0414*	-0,0511± 0,0421	**-0,4489± 0,0376***	1

Примітка: *$p \leq 0,05$

Для більш практичного застосування наведених в табл. 14 результатів, нами проведено розрахунки регресійної залежності (b) основних компонентів молока (x) на MNE, які представлено в табл. 15.

Коефіцієнт детермінації (r^2) розглядається як частка дисперсії MNE, яка обумовлена впливаючими ознаками (добовий надій, вміст жиру в молоці, вміст білка в молоці, вміст лактози в молоці, MUN, жива маса корови). За даними Таблиці 15, суттєві зміни MNE залежали від величини добового надою, а також рівню азоту сечовини молока (MUN).

На основі рівнянь регресії отримано наступні вірогідні залежності: MNE = 201,82 + 3,29*(добовий надій) + e; MNE = 319,80 - 5,93*(вміст жиру в молоці) + e; MNE = 437,16 - 42,32*(вміст білка в молоці) + e; MNE = 374,90 - 17,45*(вміст лактози в молоці) + e; MNE = 323,49 - 2,49*MUN + e; MNE = 330,05 - 0,07*(жива

маса корови) + e, а також MNE = 202,37 + 3,12*(надій, скорегований на вміст енергії) + e, (e – у всіх зазначених рівняннях-похибка).

Таблиця 15

Регресійна залежність (b) основних компонентів молока (x) та живої маси корів на MNE для виробництва молока

Впливаюча ознака (x)	Рівняння регресії де:		t-критерій Стьюдента	Коефіцієнт детермінації, r^2
	вільний член (a)	коефіцієнт регресії (b)		
Добовий надій	201,82256 ± 2,54039	3,29221 ± 0,08769	37,55 *	0,7139
Вміст жиру в молоці	319,798 ± 5,714	-5,928 ± 1,235	2,02 *	0,0392
Вміст білка в молоці	437,157 ± 26,472	-42,322 ± 7,769	7,63 *	0,0499
Вміст лактози в молоці	374,904 ± 19,764	-17,454 ± 4,209	3,88 *	0,02954
MUN	323,490 ± 2,822	-2,495 ± 0,209	11,94 *	0,2016
Жива маса корови	330,04894 ± 20,10700	-0,07038 ± 0,03825	1,84	0,0060
MNE	202,37 ± 3,00	3,12 ± 0,10	31,49 *	0.6371

Примітка: *$p \leq 0,05$

Виявлена вірогідна прямо пропорційна регресійна залежність змін добового надою з показниками MNE на виробництво молока. Така залежність не в повній мірі відображає особливості утилізації кормового азоту. Моделі, засновані на споживанні DMI або споживанні азоту можуть з хорошою точністю прогнозувати виділення азоту з калом та сечею. Але точність прогнозування може бути дещо покращена шляхом додавання параметрів складу раціону або молока до параметрів споживання в складних моделях. Базуючись на аналітичних та експериментальних даних С. Рубан [104]; P. Huhtanen *et al.* [45]; Xiaowei Zhao *et al.* [139], нами запропоновано схему для аналізу досліджень оцінки впливу ключових кормових факторів на

швидкість перетравлення TMR у жуйних тварин та змін при цьому основних компонентів молока (рис.6).

Хімічні компоненти		Окремі компоненти або їх групи			Вплив груп компонент на швидкість перетравлення
Неорганічні речовини (мінерали)					Сприяють
Органічні речовини цитоплазми клітини та її органели	Сирий протеїн	CP			Підвищують швидкість в певних співвідношеннях
	Сирий жир				
	Цукор	NFC			
	Крохмаль				
	Пектини				
Органічні речовини стінок рослинних клітини	Органічний залишок				Знижують швидкість в певних співвідношеннях
	Геміцелюлоза	NDF			
	Целюлоза		ADF		
	Лігнін			ADL	

Рисунок 6. **Умовна схема розподілу кормів рослинного походження на основні хімічні компоненти та їхній можливий вплив на швидкість перетравлення у жуйних тварин та впливу на рівень основних компонентів молока**
CP- crude protein; NFC-non-fiber carbohydrate; NDF- neutral detergent fiber; ADF- acid detergent fiber; ADL- acid detergent lignum

З метою візуалізації отриманих даних наведено рис. 7, 8, 9, де кожна точка на графіку відображає значення співставних показників по кожній корові з розрахованими коефіцієнтами детермінації (r2) та регресійною залежністю добового надою, надою, скорегованого на вміст енергії та значеннями NME (n= 595).

Встановлено вірогідну прямо пропорційну регресійну залежність між змінами добового надою та надою, скоригованого за вмістом енергії, і показниками MNE. Водночас така залежність не повною мірою відображає особливості утилізації кормового азоту.

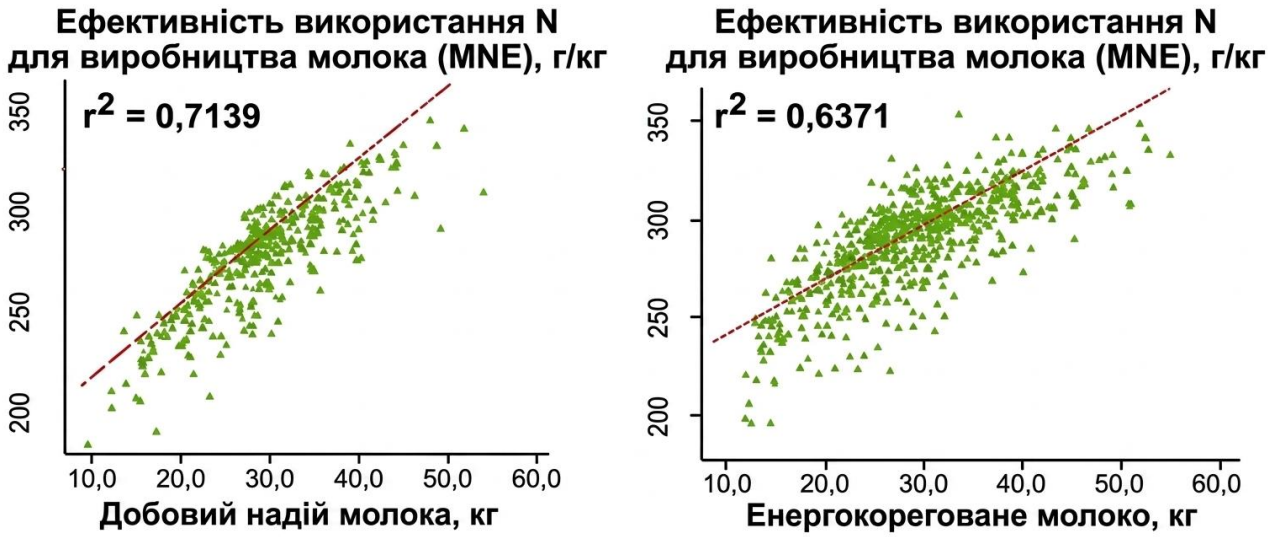

Рисунок 7. **Коефіцієнт детермінації (r^2) та регресійна залежність добового надою (b=3,29221 ± 0,08769) та надою, скорегованого на вміст енергії (b=3,11574 ± 0,09893) з значеннями NME (n= 595)**

За даними A. Bannik et al. [4, 5, 6], моделі, засновані на споживанні DMI або споживанні N, можуть з достатньою точністю прогнозувати виділення азоту з калом і сечею. Проте точність прогнозування може бути підвищена шляхом включення до моделі додаткових параметрів складу раціону або молока поряд із показниками споживання.

Аналіз абсолютних значень вмісту жиру, білка та лактози (рис. 8) свідчить про наявність від'ємної регресійної залежності між цими показниками та ефективністю використання азоту для виробництва молока (MNE).

За результатами експериментів Huhtanen et al. [45], у яких аналізувалися RAN (*rumen ammonia N concentration*) та MUN, доведено, що концентрація RAN забезпечує точніше прогнозування MNE порівняно з концентрацією MUN. Прогноз MNE покращувався, коли до моделі як незалежні змінні включали одночасно і MUN, і RAN, особливо за умови додавання показника добового надою.

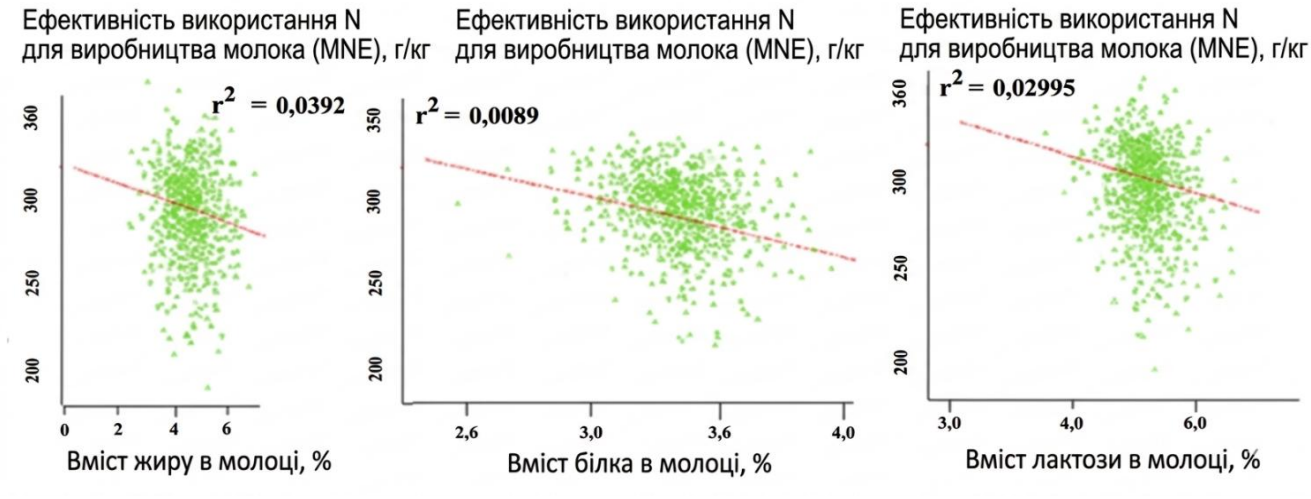

Рисунок 8. **Коефіцієнт детермінації (r^2) та регресійна залежність впливу вмісту жиру (b= - 5,928 ± 1,235), білка (b= - 42,322 ± 7,769) та лактози (b= - 17,454 ± 4,209) у молоці на значення NME (n= 595)**

Автори наводять кореляційну залежність, що ілюструє зв'язок між параметрами складу молока та бактеріальними таксонами рубця з позитивною кореляцією такого впливу. Дослідження також виявило різні реакції рубцевих бактерій на збільшення частки концентратів у раціоні, що додатково підтвердило потенційний зв'язок між мікробіомом рубця, поживними речовинами раціону, складом і продуктивністю молока.

За аналітичними даними Zhao et al. [138] можна констатувати: 1) будь-які фактори, що зумовлюють зміни MUN, можуть впливати на компоненти молока; 2) збільшення споживання СР, яке супроводжується підвищенням концентрації MUN, не впливає на вихід молочного білка, тоді як низький рівень СР може зменшувати екскрецію сечовини на фенотиповому рівні без негативного впливу на вміст молочного білка; 3) на початку лактації корови перебувають у стані негативного енергетичного балансу, що призводить до підвищення відсотка молочного жиру внаслідок мобілізації жирової тканини; у цей період MUN зазвичай має відносно низькі значення через недостатнє споживання корму порівняно з іншими фазами

лактації; 4) можлива сильна позитивна генетична кореляція (+0,85) між MUN та кількістю соматичних клітин, оскільки розвиток маститу може впливати на концентрацію MUN у молоці; водночас генетична кореляція між MUN та лактозою має помірний характер; 5) на кореляцію між MUN та складом молока впливають стадія лактації та стан здоров'я, тому зв'язок між MUN і компонентними ознаками молока є слабким або навіть незначним.

Як зазначають Zhao et al. [138], селекційний відбір корів із низькими фенотиповими значеннями MUN з метою зменшення виділення азоту не чинить негативного впливу на продуктивність і якість молока. Водночас при зниженні показників MUN шляхом селекції необхідно враховувати їх кореляцію з іншими ознаками. Наразі бракує досліджень щодо впливу підвищених рівнів MUN на смакові та ароматичні характеристики молока. Перспективним також видається вивчення впливу рівня MUN не лише на якість молочної продукції, але й на показники здоров'я споживачів у коротко- та довгостроковій перспективі з урахуванням вмісту лактози, оскільки описано зв'язки між розвитком мультифакторіальних захворювань людини та особливостями метаболізму лактози [104].

На рис. 9 наведено регресійну залежність основного показника — MUN від MNE.

За висновками Huhtanen et al. [45], концентрація MUN не є достатньо інформативним інструментом фенотипування для покращення MNE, однак її вимірювання на рівні стада дозволяє більш точно коригувати раціон з метою підвищення перетравності корму або MNE. На наш погляд, візуалізація такої залежності дає змогу виокремити тварин із високими показниками MNE за оптимальних значень MUN у діапазоні 8–12 мг/дл.

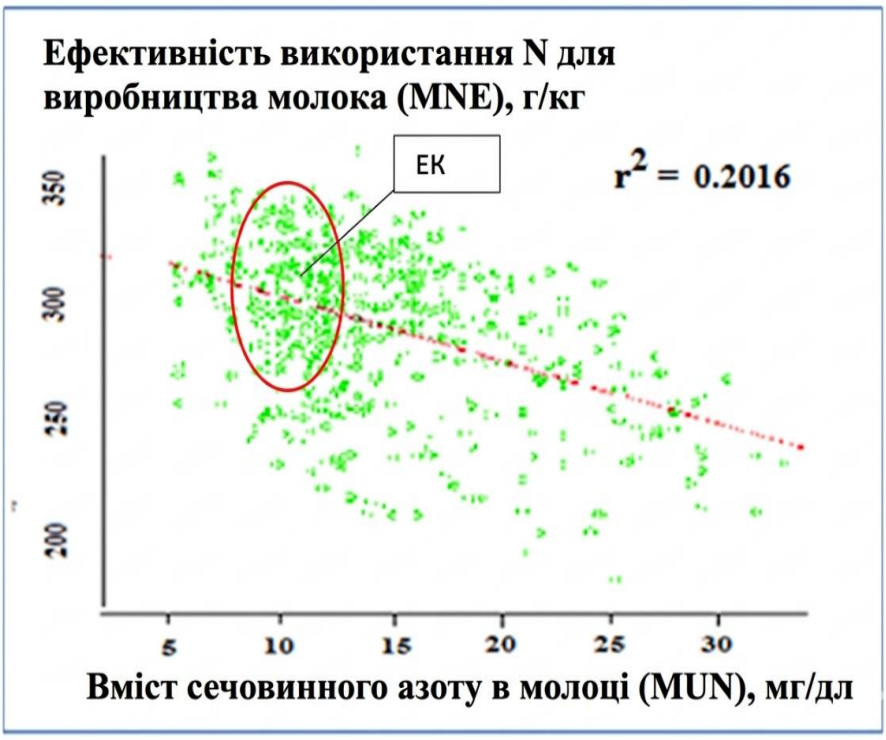

Рисунок 9. **Значення коефіцієнта детермінації (r^2) та регресійна залежність (b = - 2,495 ± 0,209) впливу вмісту MUN на значення NME, з визначенням зони - ЕК, до якої відносяться «ефективні корови» (n= 595)**

Відповідна позначка овальної форми на рис. 9 вказує на «ефективних корів» (ЕК), які поєднують високі значення MNE з оптимальними характеристиками MUN. Підвищені значення MNE (≥ 300 г/кг) в межах зазначеного інтервалу можуть свідчити про високу племінну цінність таких корів, що є важливим для селекційних програм.

Для розуміння механізму дії математичної формули MNE нами визначено значення основних змінних шляхом тестування на простих і наочних прикладах. При цьому MNE розглядається як символічна модель реального процесу, а автори не ставлять під сумнів точність цієї описової моделі.

На основі моделювання змін величини добового надою, маси корів та рівня MUN за формулою (1) продемонстровано динаміку змін MNE, що наведено на рис. 10, 11, 12.

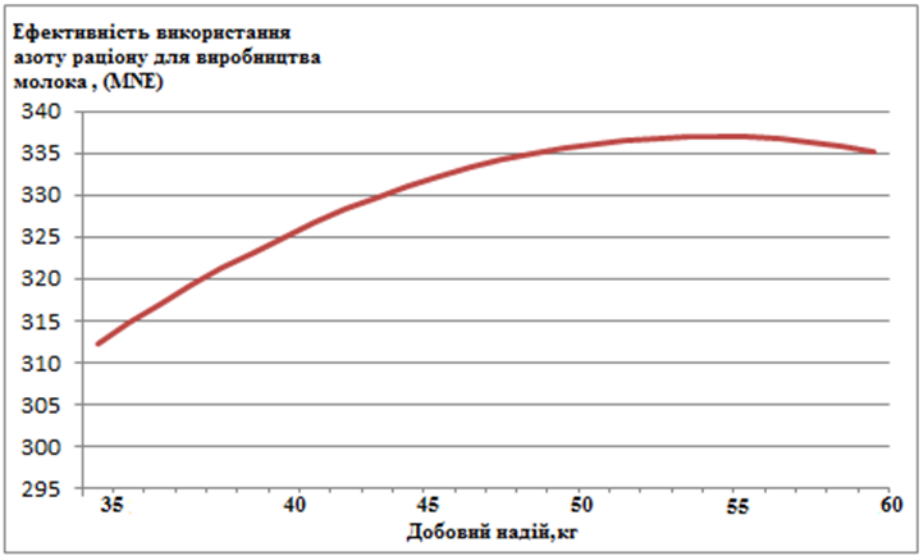

Рисунок 10. **Залежність MNE від добового надою**

Зі збільшенням добового надою MNE зростає до рівня 53 кг молока на добу, після чого стабілізується та має тенденцію до зниження. Це зумовлено тим, що формула розрахунку MNE містить квадрат добового надою з від'ємним коефіцієнтом (−0,064). Така залежність відображає можливе зростання втрат азоту за високих надоїв, оскільки забезпечення такої продуктивності потребує раціонів із підвищеним вмістом сирого протеїну.

За даними Hristov et al. [43], перспективними є стратегії, спрямовані на зниження надходження азоту з кормом, які можуть суттєво покращити ефективність використання азоту, зменшити його екскрецію із сечею, а також скоротити викиди аміаку (NH_3), нітратів (NO_3^-) і оксидів азоту (NO_2) у навколишнє середовище від молочних корів. Водночас під час оцінки потенціалу впровадження таких стратегій необхідно враховувати їхню взаємодію з енергетичним обміном, станом здоров'я

тварин, репродуктивною функцією, рівнем продуктивності та викидами метану з кишечника.

На думку авторів, існуючі моделі білкового живлення не забезпечують достатньої точності прогнозування продуктивної відповіді корів на раціони зі зниженим умістом білка, які забезпечують метаболічний протеїн (MP, від англ. *metabolizable protein*) та ключові незамінні амінокислоти (EAA, від англ. *essential amino acids*) на рівнях, нижчих за чинні рекомендації. Подальші дослідження мають бути спрямовані на усунення цих обмежень. Крім того, моделі прогнозування виходу молочного білка (MPY, від англ. *milk protein yield*) повинні інтегрувати показники білкового та енергетичного живлення, оскільки реакція на підвищення споживання CP тісно пов'язана зі збільшенням споживання енергії.

Можливості вдосконалення моделей оцінки білкового живлення залишаються обмеженими без розроблення точніших методів визначення синтезу мікробного білка в рубці (MPS, від англ. *microbial protein synthesis*), деградації протеїну та кишкової перетравності нерозщеплюваного в рубці протеїну (RUP, від англ. *rumen undegradable protein*).

У попередніх дослідженнях Huhtanen & Hristov [46] довели, що уникнення перегодовування білком є найефективнішим інструментом зменшення втрат азоту на молочних фермах. Було встановлено, що підвищення надоїв сприяє зростанню MNE за умови незмінної концентрації білка в раціоні, однак цей ефект є значно меншим порівняно з ефектом зменшення загального споживання азоту. У цьому контексті важливе значення мають жива маса корови та рівень її продуктивності: зі збільшенням надоїв зменшується відносна частка поживних речовин, що витрачаються на підтримання життєдіяльності організму (так званий ефект «розбавлення» витрат).

Чиста енергія лактації (NEL, від англ. *net energy for lactation*) — це кількість енергії, безпосередньо доступна корові для синтезу молока та підтримання життєвих

функцій після врахування втрат енергії під час ферментації та метаболізму з обмінної енергії. Розподіл енергії залежно від рівня продуктивності має такі особливості:

1) за низької продуктивності (10–15 л/добу) на підтримання організму витрачається близько 45–55% енергії;
2) за середньої продуктивності (25–30 л/добу) — 30–35% на підтримання та 65–70% на синтез молока;
3) за високої продуктивності (40 л і більше на добу) — лише 20–25% енергії спрямовується на підтримання, тоді як основна її частка використовується для виробництва молока.

Аналогічна закономірність спостерігається і щодо використання CP:

1) за низької продуктивності на підтримання організму використовується 35–45% білка;
2) за середньої — 20–25%;
3) за високої продуктивності — лише 12–15%, що свідчить про підвищення ефективності використання поживних речовин із зростанням рівня надоїв.

Щодо взаємозв'язку MNE із вмістом MUN та живою масою корів (рис. 11, 12), збільшення цих показників супроводжується монотонним зниженням MNE. Це пояснюється тим, що у формулі розрахунку MNE (формула 1) вони входять із від'ємними коефіцієнтами (−2,7 та −0,10 відповідно).

Зі зростанням рівня виробництва молока, як правило, підвищується загальне виділення N, що відображається на рівні MUN. Це пояснюється тим, що високопродуктивні корови споживають більшу кількість протеїну, проте для синтезу молока використовують лише приблизно 17–35% спожитого азоту. Хоча зі збільшенням продуктивності ефективність використання азоту частково підвищується, абсолютні втрати N із сечею та гноєм зростають. Унаслідок цього

посилюються викиди та вимивання аміаку, особливо за умов інтенсивного годівлі з високим умістом білка.

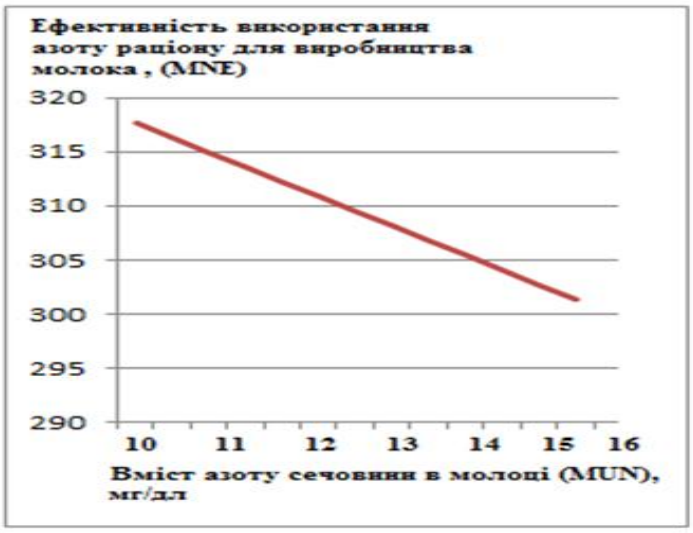

Рисунок 11. **Залежність MNE від MUN**

Водночас між високою молочною продуктивністю та живою масою корів існує позитивний зв’язок. Для тварин із більшою живою масою це означає підвищені витрати білка та енергії на підтримуючий обмін. Таким чином, показник MNE логічно відображає зазначені взаємозв’язки та закономірності (рис. 11, 12).

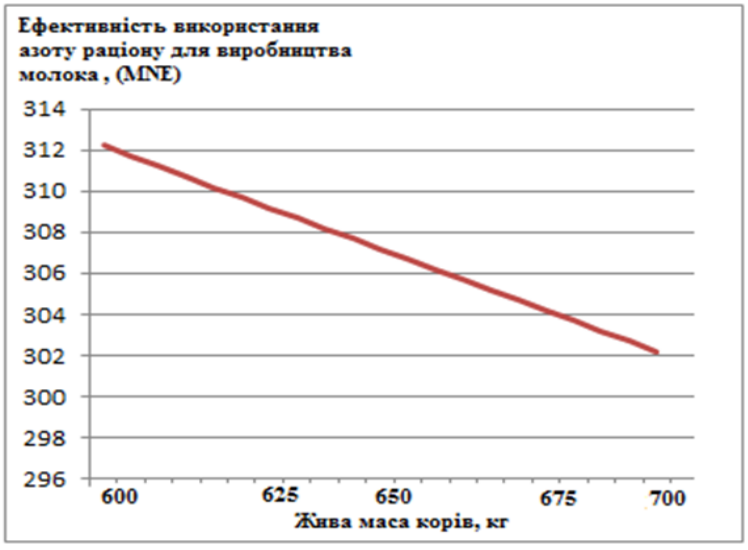

Рисунок 12. **Залежність MNE від живої маси корів**

Збільшення надоїв молока потребує підвищеного споживання сирого протеїну, що, у разі його надлишку, зумовлює надмірне надходження азоту в організм. Невикористаний азот виводиться переважно із сечею, що є одним із основних джерел його втрат у довкілля та причиною вимивання сполук азоту з навколишнього середовища. Таким чином, розглянуті ключові фактори впливу та біохімічні процеси комплексно характеризують механізми формування показника MNE у молочної худоби.

Для оцінювання генетичного впливу плідників (їх племінної цінності) на основні показники продуктивності та якісні характеристики молока (вміст жиру, білка, лактози, рівень MUN, а також MNE) доцільно застосовувати лінійну змішану модель. У такій моделі ефекти розподіляються на:

– генетичні (походження за батьком);

– фіксовані (місяць року, день лактації);

– випадкові (група доярки).

Такий підхід дозволяє коректно розмежувати спадкову складову та вплив середовищних чинників, забезпечуючи більш точну інтерпретацію отриманих результатів.

На швидкість травлення у корів впливають фактори, головним чином пов'язані з раціоном, та фізіологічним станом корови [46, 114]. Так, основні впливові фактори корму включають: 1) фазу вегетації при заготівлі сіна або сінажу; 2) вміст (концентрація) різних кормів та співвідношення в них NDF, ADF, ADL; 3) вміст та співвідношення CP, NFC; 4) тип і якість корму. Зрозуміло, що в більшості випадків швидкість перетравлення залежить від ефективності «роботи» мікробіоти рубця корови. За результатами експериментів P Huhtanen *et al.* [45], в яких аналізувалися RAN (англ. Rumen ammonia N concentration) та MUN, показано, що концентрація RAN призвела до дещо кращого прогнозування MNE порівняно з концентрацією MUN, а прогноз MNE покращився, коли концентрації як MUN, так і RAN були

включені в модель як незалежні змінні, особливо коли надій молока також був включений в модель. Автори наводять кореляційну залежність, яка ілюструє зв'язок між параметрами складу молока та бактеріальними таксонами рубця з позитивною кореляцією такого впливу. Дослідження також виявило різні реакції рубцевих бактерій на збільшення частки концентратів в раціоні, що додатково проілюструвало потенційний зв'язок між мікробіомом рубця, поживними речовинами раціону та виробництвом молока.

За аналітичними даними Xiaowei Zhao *et al.* [138], J. Spek *et al.* [118] можна констатувати:1) будь-які фактори, що викликають зміни MUN, можуть впливати на компоненти молока; 2) збільшення споживання CP, що супроводжується підвищенням концентрації MUN, не впливає на вихід молочного білка, тоді як низький вміст CP може зменшити екскрецію сечовини на фенотиповому рівні, не впливаючи негативно на вміст молочного білка; 3) на початку лактації молочні корови переживають період негативного енергетичного балансу, що призводить до збільшення відсотка молочного жиру через мобілізацію жирової тканини, впродовж цього періоду MUN зазвичай демонструє відносно низькі значення через недостатнє споживання корму порівняно з іншими періодами лактації; 4) можлива сильна позитивна генетична кореляція (+0,85) між MUN та кількістю соматичних клітин, оскільки виникнення маститу може впливати на концентрацію MUN у молоці, а середня генетична кореляція між MUN та лактозою залежна від цього; 5) на кореляцію між MUN та склад молока впливає стадія лактації та стан здоров'я, завдяки чому зв'язок між MUN та ознаками компонентів молока є слабким або навіть незначним. Як стверджує Xiaowei Zhao *et al.* [138], потенціал відбору корів з низьким фенотипом MUN для зменшення виділення азоту не впливає негативно на продуктивність та якість молока. При зниженні ознак MUN шляхом селекційного відбору необхідно оцінити їхню кореляцію з іншими ознаками.

За висновками P. Huhtanen *et al.* [45] концентрація MUN не є корисним інструментом фенотипування для покращення MNE, але вимірювання концентрації MUN на рівні стада дозволяють точно налаштувати раціон для покращення перетравності або MNE. Розділяючи думку автора про те, що важко судити, чи можна вимірювати концентрації MUN для окремих корів та використовувати його для надійного ранжування за ефективним використанням азоту, вважаємо за доцільне використовувати ці значення в програмах оцінки та відбору для надійного прогнозування отриманого ефекту за молочною продуктивністю, складу молока та ефективності використання азоту. За даними метааналізу Xiaowei Zhao *et al.* [139] підвищені значення MUN можуть свідчити про надмірний CP у раціоні або недостатній NFC, тоді як низькі значення MUN свідчать про необхідність оцінки джерел CP та вуглеводів у раціоні (рис. 13).

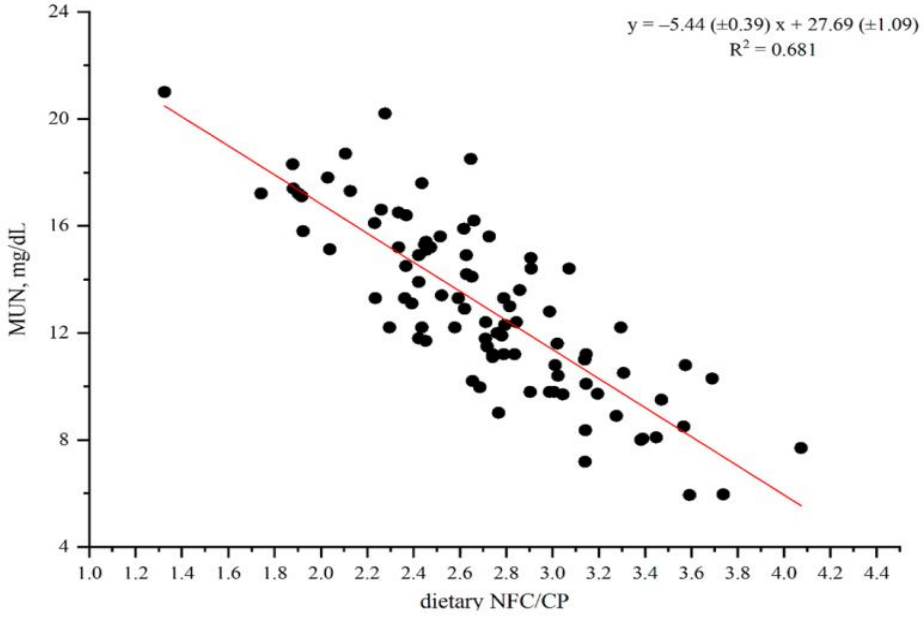

Рисунок 13. **Лінійний регресійний аналіз співвідношення NFC/CP у раціоні та вмісту MUN для набору даних, n = 91**
Кожна крапка представляє окреме спостереження, включене до метааналізу
Джерело: Xiaowei Zhao et al. [139]

Ці результати свідчать про те, що співвідношення NFC/CP у раціоні суттєво впливає на концентрацію MUN. Крім того, здається ймовірним, що шляхом спільного моніторингу рівнів MUN, NFC та CP виробники молочної продукції можуть досягти кращого балансу NFC та CP у раціонах, що дозволить оптимізувати рецептуру кормів та покращити управління молочними коровами.

У випадках коли MUN, що перевищує 16 мг/дл або нижче 8 мг/дл, свідчить про співвідношення NFC/CP у раціоні менше 2,15 або більше 3,60. Контролюючи концентрації MUN, фермери можуть ефективніше керувати своїми програмами годівлі, контролювати виробничі витрати та зменшувати викиди N в навколишнє середовище.

За аналітичними даними X. Zhao [138, 139] та інш. можна констатувати: 1)будь-які фактори, що викликають зміни MUN, можуть впливати на компоненти молока; 2)збільшення споживання CP, що супроводжується підвищенням концентрації MUN, не впливає на вихід молочного білка, тоді як низький вміст CP може зменшити екскрецію сечовини на фенотиповому рівні, не впливаючи негативно на вміст молочного білка; 3) на початку лактації молочні корови перебувають в періоді негативного енергетичного балансу, що призводить до збільшення відсотка молочного жиру через мобілізацію жирової тканини, впродовж цього періоду MUN зазвичай демонструє відносно низькі значення через недостатнє споживання корму порівняно з іншими періодами лактації; 4) можлива сильна позитивна генетична кореляція (+0,85) між MUN та кількістю соматичних клітин, оскільки виникнення маститу може впливати на концентрацію MUN у молоці, а середня генетична кореляція між MUN та лактозою залежна від цього; 5) на кореляцію між MUN та склад молока впливає стадія лактації та стан здоров'я, завдяки чому зв'язок між MUN та ознаками компонентів молока є слабким або навіть незначним.

Потенціал відбору корів з низьким фенотипом MUN для зменшення виділення азоту не впливає негативно на продуктивність та якість молока. При зниженні ознак MUN шляхом селекційного відбору необхідно оцінити їхню кореляцію з іншими ознаками.

За висновками P. Huhtanen та ін. [45, 46] концентрація MUN не є корисним інструментом фенотипування для покращення MNE, але вимірювання концентрації MUN на рівні стада дозволяють точно налаштувати раціон для покращення перетравлюваності або MNE. За даними V. Ishler найбільш рекомендовані діапазони MUN коливаються від 8 до 12 мг/дл, що відображає раціони з балансом білка 16%, та наявність білкових фракцій і вуглеводів для уловлювання надлишком аміаку в рубці. У таблиці 16 наведені результати моделювання змін MNE раціону для виробництва молока при зміні значень добового надою, показників молока, живої маси корів та надою, скорегованого на енергетичний вміст відповідно до рівнянь лінійної регресії.

Таблиця 16

Моделювання змін MNE призмінах основних компонент молока

Контрольний показник	Зміна добового надою, кг						
	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00
MNE	218,27	234,72	251,17	267,62	284,07	300,52	316,97
	Зміна вмісту жиру в молоці, %						
	0,50	1,00	1,50	2.00	2,50	3,00	3,50
MNE	316,84	313,87	310,91	307,94	304,98	302,01	299,05
	Зміна вмісту білка в молоці, %						
	0,50	1,00	1,50	2.00	2,50	3,00	3,50
MNE	416,00	394,84	373,68	352,52	331,36	310,20	289,04
	Зміна вмісту лактози в молоці, %						
	0,50	1,00	1,50	2.00	2,50	3,00	3,50
MNE	366,18	357,45	348,73	340,00	331,28	322,55	313,83
	Зміна вмісту азоту сечовини в молоці (MUN), мг/дл						

	5,00	10,00	15.00	20,00	25,00	30.00	35.00
MNE	311,04	298,59	286,14	273,69	261,24	248,79	236,34
	Зміна живої маси корови, кг						
	10,00	30,00	50,00	70,00	90,00	110,00	130,00
MNE	329,35	327,95	326,55	325,15	323,75	322,35	320,95
	Зміна надою, скорегованого на енергетичний вміст, кг						
	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00
MNE	233,57	264,77	295,97	327,17	358,37	389,57	420,77

Примітка: враховується зміна значень добового надою, показників молока, живої маси корів та надою, скорегованого на енергетичний вміст

Встановлено, що збільшення MNE раціону для виробництва молока виявлено лише за двома показниками: добовому надою та надою, скорегованому за енергетичним вмістом. При збільшенні таких показників як вміст жиру, білка, лактози, MUN та живої маси корів, MNE раціону для виробництва молока зменшується.

Низькі значення MUN (<8-10 мг/дл) вказують на можливий дефіцит білка в раціоні, який може виникнути, коли знижується активність бактерій рубця, що обмежує утворення молока та синтез молочного білка.

Аналізуючи експериментальні дані P. Huhtanen та інш. [45] та отримані результати в даній роботі (рис. 10, 11, 12) зроблено попередні висновки про коректність оцінок MNE, при значеннях рівня MUN в межах 8-12 мг/дл. Вважаємо доцільним використовувати ці параметри в програмах оцінки та відбору для надійного прогнозування отриманого ефекту за молочною продуктивністю, складом молока та MNE.

Для більш практичного застосування наведених у табл. 17 результатів, нами проведено розрахунки регресійної залежності (b) виробництва молока та MUN (x) на NME.

Таблиця 17

Регресійна залежність (b) виробництва молока та MUN (x) на MNE для виробництва молока

Впливаюча ознака (x)	Рівняння регресії де:		t
	вільний член (a)	коефіцієнт регресії (b)	
Добовий надій	201,82256 ± 2,54039	3,29221 ± 0,08769	37,55 *
MUN	323,490 ± 2,822	-2,495 ± 0,209	11,94 *

Примітка: *$p \leq 0,05$

За результатами експериментів Huhtanen et al. [45]**,** у яких аналізувалися показники RAN (англ. *rumen ammonia N concentration*) та MUN, доведено, що концентрація RAN забезпечує точніше прогнозування MNE порівняно з концентрацією MUN. Водночас точність прогнозу MNE підвищувалася у разі включення до моделі як концентрацій MUN і RAN, так і величини надою молока як незалежних змінних. Автори наводять кореляційну залежність, яка ілюструє зв'язок між параметрами складу молока та бактеріальними таксонами рубця з позитивною кореляцією такого впливу. Дослідження також виявило різні реакції рубцевих бактерій на збільшення частки концентратів у раціоні, що додатково ілюструє потенційний зв’язок між мікробіомом рубця, поживними компонентами раціону, складом молока та рівнем його продукції.

За аналітичними даними Zhao et al. [138] можна констатувати: 1) будь-які фактори, що викликають зміни MUN, можуть впливати на компоненти молока; 2) збільшення споживання CP, що супроводжується підвищенням концентрації MUN, не впливає на вихід молочного білка, тоді як низький вміст CP може зменшити екскрецію сечовини на фенотиповому рівні, не впливаючи негативно на вміст молочного білка; 3) на початку лактації молочні корови переживають період негативного енергетичного балансу, що призводить до збільшення відсотка молочного жиру через мобілізацію жирової тканини. Впродовж цього періоду MUN зазвичай демонструє відносно низькі значення через недостатнє споживання корму

порівняно з іншими періодами лактації; 4) можлива сильна позитивна генетична кореляція (+0,85) між MUN та кількістю соматичних клітин, оскільки виникнення маститу може впливати на концентрацію MUN у молоці, а середня генетична кореляція між MUN та лактозою залежна від цього; 5) на кореляцію між MUN та склад молока впливає стадія лактації та стан здоров'я, завдяки чому зв'язок між MUN та ознаками компонентів молока є слабким або навіть незначним.

Як стверджує Zhao et al. [138], потенціал відбору корів із низьким фенотипом MUN для зменшення виділення азоту не впливає негативно на продуктивність та якість молока. При зниженні ознак MUN шляхом селекційного відбору необхідно оцінювати їхню кореляцію з іншими ознаками. Водночас, досі бракує досліджень щодо впливу рівнів MUN на смак та ароматичні складові молока при високих його значеннях. Також перспективною видається оцінка впливу рівнів MUN не лише на якість молочної продукції, але й на показники здоров’я споживачів у коротко- та довгостроковій перспективі з урахуванням вмісту лактози. Це обґрунтовується наявністю описаних зв’язків між розвитком мультифакторіальних захворювань людини та особливостями метаболізму лактози [103].

Така залежність є цілком логічною, оскільки відображає прояв оптимальних значень MUN на рівні 8–12 мг/дл, за яких спостерігаються вищі значення MNE та ефективніше виробництво молока. За висновками Huhtanen et al. [45], концентрація MUN сама по собі не є ефективним інструментом фенотипування для генетичного покращення MNE. Водночас вимірювання рівня MUN на рівні стада дозволяє більш точно коригувати раціони з метою підвищення перетравності поживних речовин і ефективності використання азоту.

За даними Ishler [49], рекомендований діапазон значень MUN становить 8–12 мг/дл, що відповідає раціонам із вмістом сирого білка близько 16% та збалансованим співвідношенням білкових фракцій і вуглеводів, необхідних для уловлювання надлишкового аміаку в рубці. Низькі значення MUN (<8–10 мг/дл) свідчать про

можливий дефіцит білка в раціоні, який може бути пов’язаний зі зниженням активності рубцевих мікроорганізмів, що, своєю чергою, обмежує молочну продуктивність і синтез молочного білка.

Аналізуючи експериментальні дані Huhtanen et al. [45], Ishler [49] та отримані результати в цій роботі (рис. 1) зроблено попередні висновки про коректність оцінок ефективності використанням азоту (MNE) при значеннях рівня сечовини молока (MUN) в межах 8-12 мг/дл. Вважаємо за доцільне використовувати ці значення в програмах оцінки та відбору для надійного прогнозування отриманого ефекта за молочною продуктивністю, складом молока й MNE.

3.3. Економічна ефективність результатів досліджень

Проблема виробництва харчового білка обумовлена постійним дисбалансом між зростаючим попитом та можливостями виробництва білків рослинного та тваринного походження в умовах обмежених земельних та енергетичних ресурсів. Для оцінки економічної ефективності отриманих результатів використано власні експериментальні дані за результатами досліджень вітчизняних та закордонних практиків і науковців. Запропонований підхід базується із співвідношенням конверсії «вхідного» азоту корму до втрат азоту з кінцевими продуктами обміну речовин у корів, що виводяться з організму (сеча, гній, піт, вуглекислий газ).

Експериментальним шляхом доведено, що азот сечовини молока – MUN, є ключовим біомаркером, який дозволяє оцінити, наскільки ефективно організм корови переробляє азот корму в молочний білок, а також слугує індикатором балансу між протеїном та енергією в рубці жуйних.

Коєфіцієнти перерахунку на азотний еквівалент, взяті з емпірично обґрунтованих математичних моделей, які описували зв’язок екскреції азоту сечовини молока з азотом сечі (UUN) представлених у роботах A. J. Kauffman, N. R. St-Pierre, J. W. Spek, et al. [61, 117]. У даному випадку UUN являється найбільш комплексним та точним показником таких втрат, а тісний зв'язок з MUN робить останній надійним предиктором таких процесів. Відповідно до робіт J. S. Jonker, R. A. Kohn, R. A. Erdman вивчено коливання MUN у залежності від фази лактації (рис. 14), що доводить прогностичність цього показника для можливих оцінок впродовж всього циклу синтезу молока [54].

Наведені закономірності та отримані результати дали можливість побудувати оцінку економічної ефективності в молочному скотарстві за рівнем втрат азоту від порогових значень MUN.

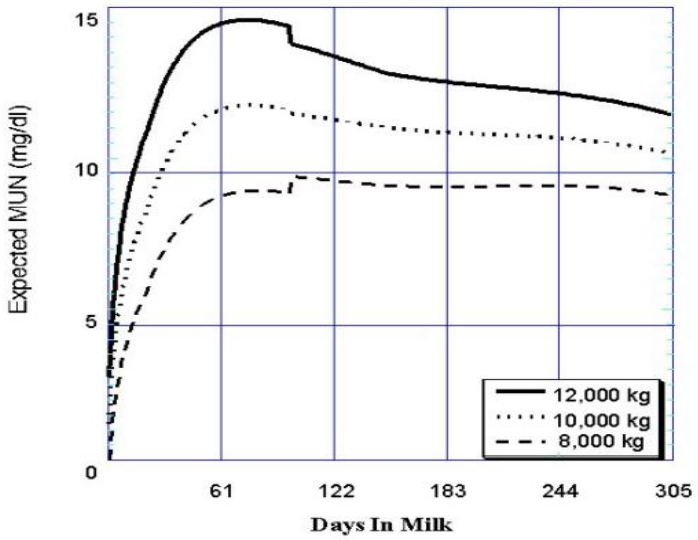

Рисунок 14. **Залежність коливання MUN від рівня молочної продуктивності та дня лактації.**

Частина базових тверджень будуються на основі матеріалі, які представлено в фундаментальних роботах вітчизняних і закордонних науковців та практиків. Такі базові підходи передбачають:

1. Станом на квітень 2026 року собівартість спожитого добового базового загально змішаного раціону (TMR) в Україні для корів голштинської породи з живою масою корів 600-620 кг при надої 33-35 л складав у межах 190-200 грн;
2. Раціон у фізичній вазі був на рівні 50-55 кг при кількості сухої речовини в кормі DM (англ. Dry matter) 45 – 50%. Так, при нормативному розрахунку споживання корму в межах 3.8 – 4.0% DM на 100 кг живої маси корови на добу можуть спожити в межах 25 кг DM (приклад: 610 кг × 3,9% ≈ 23,5 – 24,5 кг DM);
3. Відповідно до пунктів 1-2 умовна ціна 1 кг DM взята в межах 8 грн з розрахунку: 200 грн / 25 кг = 8 грн;
4. Діапазон коливань сирого протеїну в кілограмі DM взято 15%, 16%, 17%;
5. Оптимальне значення MUN взято в межах 8-12 мг/дл при можливих відхиленнях від верхнього значення норми - 2 мг/дл, 4 мг/дл, 6 мг/дл, 8 мг/дл;

6. Нормативний коефіцієнти перерахунку на вміст азоту в кормі по значенню сирого протеїну склав 6,25 %;

7. Загальні втрати азоту визначались по відхиленням від оптимального значення MUN (взято за 12 мг/дл) при втратах 10-12 г азоту на кожні 1мг/дл MUN вище зазначеної норми DM [54];

8. Курс валют за даними курсу Національного банку України станом на кінець квітня 2026 року взято 43,85 грн/USD.

Основні розрахунки з використанням певних базових підходів, які зазначені вище, представлено в таблицях 18, 19, 20.

Таблиця 18

Оцінка ціни «вхідного» азоту корму спожитого добового раціону в залежності від рівня сирого протеїну та собівартості загально змішаного раціону (квітень 2026 року)

Показники	Градації рівня сирого протеїну в 1кг сухої речовини корму (DM),%		
	15	16	17
Кількість азоту в 1 кг DM, кг (CP: 6,25)	0,024	0,026	0,027
Кількість азоту в 1 кг DM, г	24	26	27
Ціна одного граму азоту, грн (8 грн: 24, 26, 27)	0,33	0,31	0.30

Враховуючи той факт, що коливання MUN мають суттєві відхилення як серед окремих тварин так й певних технологічних груп, коли на піку лактації корів при роздої це значення може підвищуватись (рис. 14), діапазон відхилень від норми був взятий в межах від 2 до 8 (верхня межа) мг/дл (табл. 19).

Таблиця 19

Оцінка грошових втрат кормового азоту в добовому раціоні в залежності величини відхилень MUN від порогової норми 12 мг/дл

Значення відхилення MUN від верхньої межі норми, мг/дл*	Діапазон цін одного граму азоту, грн		
	0,33	0,31	0,25
2	6,6	6,2	5,8
4	13,2	12,4	11,6
6	19,8	18,6	17,4
8	26,4	24,8	23,2

Примітка: *1 мг/дл. був еквівалентний загальним втратам азоту на рівні 10 г

Враховуючи подовженість стандартного лактаційного циклу у 305 днів, хоча на практиці спостерігається подовженість лактації до 400-420 днів, контрольний розрахунок втрат було взято зв стандартний період (табл. 20).

Таблиця 20

Оцінка грошових втрат кормового азоту в за період стандартної лактації у 305 днів в залежності величини відхилень MUN від порогової норми 12 мг/дл

Значення відхилення MUN від верхньої межі норми, мг/дл	Діапазон цін одного граму азоту, грн		
	0,33	0,31	0,25
2	2013	1891	1769
4*	**4026**	**3782**	**3538**
6	6039	5673	5307
8	8052	7564	7076

Примітка: * Середнє значення для подальших розрахунків

Середній рівень грошових втрат при відхиленні від норми на рівні 4 мг/дл, може скласти від 3500 до 4000 грн за лактацію (табл. 20) в розрахунку на одну корову. Така сума втрат еквівалентна 75-85 USD, хоча її можна прирівняти до суми економії ресурсів при виконанні нормативних вимог по MUN у межах 8-12 мг/дл.

У даній роботі представлено основні підходи щодо оцінки та використання значень MUN за рахунок селекційних у програмах відбору, та організаційних підходів в програмах годівлі.

Загальна економія ресурсів в межах 75-85 USD не є на перший погляд значною, але при використанні зазначених підходів на поголів'ї у 1000 корів ця сума складає загалом 75-87 тис. USD, що еквівалентно 3,5-4,0 млн грн. Таким чином підтверджено отримання економічного ефекту за рахунок використання оцінки MUN як одного з предикторів успішного ведення молочного скотарства.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасному молочному скотарстві важливого значення набуває використання предикторних показників, які дозволяють оцінювати ефективність виробництва та прогнозувати продуктивність тварин. Такі індикатори повинні відображати взаємозв'язок між годівлею, метаболічним станом і продуктивними ознаками, що забезпечує їх практичну цінність у системах управління стадом.

Одним із найбільш інформативних показників у цьому контексті є рівень азоту сечовини молока (MUN), який характеризує баланс між надходженням білка з кормом та його використанням організмом [85]. Встановлено, що зміни цього показника можуть випереджати зміни продуктивності, що дозволяє використовувати його для ранньої оцінки ефективності годівлі [16, 17, 88].

Таким чином, використання показників азотного обміну як предикторів створює підґрунтя для аналізу ефективності використання кормів, продуктивності та якості молока в умовах сучасного молочного виробництва [139].

Отримані результати свідчать про те, що біохімічні показники крові, зокрема рівень сечовини, можуть розглядатися як інтегральні індикатори білково-енергетичного обміну у молочних корів. Їх зміни відображають не лише особливості засвоєння кормів, а й пов'язані з відтворювальною здатністю, станом здоров'я тварин та ефективністю використання азоту. Це підтверджує доцільність використання комплексу біохімічних маркерів для оцінки фізіологічного стану корів і оптимізації систем годівлі.

Аналіз продуктивних показників дозволив встановити суттєві міжпородні відмінності, що проявляються як у рівні надоїв, так і в якісних характеристиках молока. При цьому більш високі надої характерні для спеціалізованих молочних порід, тоді як комбіновані породи демонструють вищий вміст жиру. Така закономірність свідчить про різну спрямованість селекції та особливості обміну

речовин, що безпосередньо впливають на ефективність використання поживних речовин, особливо азоту.

Дисперсійний аналіз підтвердив визначальну роль породного фактору у формуванні як продуктивних, так і біохімічних показників. Встановлено, що саме генетичні особливості зумовлюють значну частку варіабельності таких параметрів, як вміст жиру в молоці та його енергетична цінність, що свідчить про глибокий зв’язок між генотипом тварини та процесами синтезу компонентів молока. Отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про необхідність урахування генетичних факторів при оцінці ефективності використання кормів і формуванні продуктивності.

Встановлено, що породна належність істотно впливає на широкий спектр біохімічних показників крові. Найбільш чутливими до цього фактору виявилися рівні сечовини, креатиніну, білірубіну, альбуміну та ферментів печінки. Така залежність свідчить про існування породної специфіки метаболічних процесів, яка формується під впливом тривалої селекції та адаптації до певних умов утримання і годівлі. При цьому вплив негенетичних факторів, таких як стадія лактації або тільності, хоча і простежується, проте значно поступається за силою впливу генетичним особливостям.

Отримані дані підтверджують доцільність використання концептуальних моделей для опису метаболічних процесів у жуйних тварин. Зокрема, «модель корови Моллі» дозволяє інтегрувати процеси травлення, метаболізму та продукції молока в єдину систему, що базується на математичному описі потоків азоту в організмі [34, 78]. Використання таких моделей дає змогу більш глибоко інтерпретувати отримані результати та пояснити вплив як генетичних, так і організованих факторів на ефективність використання азоту.

Важливим результатом дослідження є встановлення взаємозв’язків між біохімічними показниками крові, що дозволяє розглядати їх як елементи єдиної

метаболічної системи. Виявлений позитивний зв’язок між рівнем сечовини та креатиніну свідчить про узгодженість процесів білкового обміну та енергетичного забезпечення організму. Це може бути пов’язано з тим, що обидва показники відображають інтенсивність катаболічних процесів і рівень навантаження на організм тварини.

Позитивні кореляційні зв’язки між креатиніном, аспартатамінотрансферазою та альбуміном характеризують функціональний стан печінки та білковий обмін, що узгоджується з результатами інших досліджень [29]. Водночас виявлений негативний зв’язок між рівнем сечовини та аланінамінотрансферазою свідчить про складність регуляції азотного обміну та можливу участь компенсаторних механізмів у підтриманні гомеостазу.

Окрему увагу слід приділити взаємозв’язку між рівнем білірубіну, глюкози та ферментів печінки. Виявлені позитивні кореляції підтверджують участь цих показників у регуляції обмінних процесів та їх роль у забезпеченні антиоксидантного захисту організму [69]. Узгодженість змін цих показників у різних породних групах свідчить про наявність загальних закономірностей метаболізму при збереженні генетично зумовлених відмінностей.

Аналіз рівня сечовини дозволив підтвердити його високу інформативність як показника ефективності годівлі. Встановлено, що він безпосередньо залежить від вмісту сирого протеїну в раціоні та балансу між білком і енергією. За даними [105], підвищення рівня білка в раціоні призводить до зростання концентрації сечовини, тоді як її зниження спричиняє рециркуляцію азоту в рубці. Це підкреслює важливість оптимізації раціонів з метою забезпечення ефективного використання поживних речовин.

Разом із тим встановлено, що рівень сечовини змінюється залежно від стадії лактації, умов утримання та фізіологічного стану тварин. У пасовищних системах, де раціони характеризуються високим вмістом сирого протеїну, спостерігаються вищі

значення цього показника, що пов’язано з особливостями годівлі та рівнем фізичної активності тварин. Це свідчить про необхідність урахування умов виробництва при інтерпретації результатів.

Кореляційний аналіз підтвердив наявність тісних взаємозв’язків між рівнем сечовини та іншими біохімічними показниками, що дозволяє використовувати його як інтегральний маркер метаболічного стану. Зокрема, встановлено позитивний зв’язок із креатиніном, альбуміном і загальним білком, що свідчить про участь цього показника у регуляції білкового обміну. Водночас слабкі або відсутні зв’язки з окремими показниками вказують на складний характер метаболічних взаємодій.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що породна специфіка метаболічних процесів є важливим фактором, який необхідно враховувати при розробці селекційних програм. Встановлені відмінності між породами можуть бути використані для цілеспрямованого відбору тварин із більш ефективним використанням азоту, що сприятиме підвищенню продуктивності та зниженню негативного впливу на довкілля.

Особливе значення має оцінка рівня сечовини як фактора, що впливає на репродуктивну функцію. Встановлено, що як надмірно високі, так і низькі значення цього показника є небажаними, оскільки вони порушують нормальний перебіг фізіологічних процесів. Підвищений рівень сечовини може призводити до накопичення аміаку, що негативно впливає на функціонування репродуктивної системи, тоді як його зниження свідчить про дефіцит білка і обмеження продуктивності.

Результати дослідження підтверджують, що показники MUN і BUN характеризуються низьким або помірним рівнем успадковуваності та пов’язані з рівнем виділення азоту. За даними X. Zhao et al. [139], існують певні суперечності щодо доцільності відбору тварин із низьким рівнем MUN, оскільки це може по-різному впливати на продуктивність і економічні показники. Водночас більшість

дослідників погоджуються, що контроль цього показника є важливим інструментом управління годівлею.

Додатково встановлено, що зміни біохімічних показників можуть бути пов’язані з індивідуальною реакцією організму на зовнішні фактори, включаючи дію ксенобіотиків, що залежить від генетичних особливостей тварин [103]. Це підкреслює необхідність урахування генотипу при оцінці фізіологічного стану та розробці систем управління стадом.

Таким чином, отримані результати свідчать про складний і багатофакторний характер формування продуктивності та метаболічного статусу молочних корів. Породна належність, рівень годівлі, умови утримання та фізіологічний стан тварин формують єдину систему взаємопов’язаних процесів, у межах якої відбувається реалізація продуктивного потенціалу.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що використання біохімічних показників крові, зокрема рівня сечовини, у поєднанні з аналізом продуктивності та генетичних особливостей тварин дозволяє підвищити точність оцінки ефективності виробництва. Такий підхід відкриває можливості для оптимізації систем годівлі, вдосконалення селекційних програм і зменшення екологічного навантаження.

Отримані результати дослідження свідчать про те, що біохімічні показники крові, зокрема рівень сечовини, є важливими інтегральними індикаторами білково-енергетичного обміну у молочних корів і тісно пов’язані з процесами формування молока. Оскільки кров є основним джерелом субстратів для синтезу компонентів молока в молочній залозі, зміни її біохімічного складу безпосередньо відображаються на якісних показниках продукції. Це обґрунтовує доцільність комплексного підходу до оцінки продуктивності, який поєднує аналіз метаболічного статусу тварин із характеристиками молока.

Аналіз продуктивних показників показав значну варіабельність надоїв, вмісту молочного жиру та живої маси корів залежно від лактаційного періоду. Виявлена тенденція до зростання продуктивності у середніх лактаціях із подальшим її зниженням у старших вікових групах відображає фізіологічні закономірності реалізації продуктивного потенціалу та вікові зміни організму. Це підтверджує, що продуктивність є динамічною ознакою, яка формується під впливом комплексу генетичних і середовищних факторів.

Встановлено значний діапазон коливань рівня азоту сечовини молока, що свідчить про неоднорідність білкового живлення в межах стада та різний рівень ефективності використання азоту. Виділення оптимального інтервалу значень дозволило пов’язати його з показниками відтворення. Зокрема, встановлено, що найкращі репродуктивні показники спостерігаються за середніх значень MUN, тоді як як його підвищення, так і зниження мають негативні наслідки. Надлишок сечовини супроводжується підвищенням рівня аміаку, що змінює кислотно-лужний баланс середовища матки, негативно впливає на життєздатність сперматозоїдів і може спричиняти ранню ембріональну смертність, а також призводить до перевантаження печінки і порушення гормонального балансу. Водночас низькі значення MUN свідчать про дефіцит білка, що обмежує синтез молока і знижує продуктивність.

Аналіз впливу факторів середовища показав, що найбільшу роль у формуванні продуктивних і якісних показників відіграють сезонні умови, зокрема рік і місяць отелення. Незважаючи на застосування стандартизованих раціонів, зміни температури, умов утримання та структури кормів протягом року суттєво впливають на надій, вміст жиру, білка та інші характеристики молока. Генетичний фактор, пов’язаний із походженням за батьком, також має статистично значущий вплив, однак його величина є меншою порівняно з впливом середовища. Це свідчить про

домінуючу роль організованих факторів у конкретних виробничих умовах і необхідність урахування взаємодії «генотип – середовище».

Подібні закономірності встановлено і щодо якісних показників молока, де вплив сезонних факторів перевищує вплив генетичних. Навіть незначні зміни в годівлі або температурному режимі можуть призводити до суттєвих коливань вмісту жиру, білка, лактози та рівня MUN. При цьому вплив плідника на рівень MUN у дочок є незначним, що свідчить про складну природу цієї ознаки та її значну залежність від умов утримання. У зв’язку з цим доцільним є використання не лише абсолютних значень показників, а й аналіз їх динаміки в часі, що відповідає концепції норми реакції «генотип – середовище».

Отримані результати узгоджуються з сучасними підходами до управління молочним стадом, зокрема із системами моніторингу MUN, які використовуються в програмах DHI [138]. При цьому інтерпретація рівня MUN залишається складною через варіабельність рекомендованих значень. За даними V. Ishler [49], оптимальний діапазон може коливатися, однак найбільш обґрунтованими вважаються значення 8–12 мг/дл, які відповідають збалансованим раціонам за білком і енергією.

Встановлено, що збільшення вмісту сирого протеїну в раціоні призводить до підвищення рівня MUN, однак це не завжди супроводжується зростанням продуктивності [81]. Така ситуація свідчить про неефективне використання азоту, коли його надлишок виводиться з організму, що супроводжується додатковими енергетичними витратами і підвищеним екологічним навантаженням. Це підтверджує необхідність оптимізації співвідношення білка і енергії в раціоні.

Аналіз взаємозв’язків між показниками молока показав, що енергетична цінність продукції значною мірою визначається рівнем надоїв, тоді як зв’язок із MUN є слабким. Водночас при високих значеннях MUN спостерігається тенденція до зниження енергетичної цінності молока, що пов’язано з погіршенням синтезу

його основних компонентів. Це підтверджує, що надлишок азоту не сприяє підвищенню продуктивності, а може мати протилежний ефект.

Оцінка ефективності використання азоту для виробництва молока показала, що цей показник найбільше залежить від рівня продуктивності та умов середовища. Встановлено тісний позитивний зв'язок між добовим надоєм і ефективністю використання азоту, що свідчить про більш ефективне використання поживних речовин у високопродуктивних тварин. Водночас збільшення вмісту жиру, білка, лактози та рівня MUN супроводжується зниженням цього показника, що відображає складний характер метаболічних процесів.

Регресійний аналіз підтвердив, що добовий надій є основним фактором, який визначає ефективність використання азоту, тоді як інші показники мають від'ємний вплив. Це означає, що підвищення продуктивності сприяє кращому використанню азоту, однак лише за умови збалансованого раціону. У разі надлишку білка або дефіциту енергії ефективність використання азоту знижується.

Отримані результати узгоджуються з даними V. Ishler [49], які показали, що для точного прогнозування використання азоту необхідно враховувати не лише споживання корму, а й його склад. Аналогічно, P. Huhtanen et al. [45] довели, що включення додаткових параметрів, таких як склад молока, підвищує точність моделей прогнозування.

Важливу роль у формуванні продуктивності відіграє мікробіота рубця, яка забезпечує перетворення поживних речовин у доступні форми. Дослідження I. Mizrahi et al. [80] підтверджують існування взаємозв'язків між складом молока та мікробним складом рубця, що свідчить про складний характер регуляції продуктивності на мікробіологічному рівні.

Аналіз співвідношення вуглеводів і білка в раціоні показав, що саме цей баланс визначає рівень MUN. За даними Xiaowei Zhao et al. [45], відхилення від оптимального співвідношення NFC/CP призводить до змін концентрації сечовини,

що відображає дисбаланс у годівлі. Це підкреслює важливість контролю складу раціону для забезпечення ефективного використання азоту.

Зростання продуктивності супроводжується збільшенням споживання білка, однак лише частина цього азоту використовується для синтезу молока. Решта виводиться з організму, що призводить до зростання втрат азоту та екологічного навантаження. Це підтверджується результатами Hristov et al. [42, 43], які підкреслюють необхідність оптимізації білкового живлення.

Встановлено, що зі зростанням продуктивності зменшується частка поживних речовин, яка витрачається на підтримання організму, що свідчить про підвищення ефективності їх використання. Водночас збільшення живої маси корів супроводжується зниженням ефективності використання азоту, що пов’язано з підвищеними витратами на підтримуючий обмін.

Загалом результати дослідження свідчать про складний багатофакторний характер формування продуктивності та ефективності використання азоту. Встановлено, що оптимальні значення MUN у межах 8–12 мг/дл забезпечують найбільш ефективне використання поживних речовин, найкращі показники продуктивності та відтворення.

Таким чином, рівень MUN може розглядатися як важливий інструмент управління годівлею та оцінки метаболічного стану корів. Його використання у поєднанні з іншими показниками дозволяє підвищити ефективність виробництва, оптимізувати раціони та зменшити негативний вплив на довкілля. Водночас для більш точної оцінки доцільно застосовувати комплексні підходи, що враховують як біохімічні, так і продуктивні показники, а також взаємодію генетичних і середовищних факторів.

ВИСНОВКИ

1. Актуальним напрямом феноміки в програмах відбору та менеджменту є обгрунтування компонент молока не тільки за показниками якості та харчової цінності, а й як предикторів стану здоров'я, рівня відтворення, контролю правильності побудови раціону, індикаторів впливу на довкілля.
2. Азот сечовини молока (MUN) служить надійним індикатором метаболізму білка молочних корів, що дає змогу вивчати такі особливості та керувати в послідуючому процесом підвищення ефективності в сфері розведення та менеджменту.
3. Установлено значущий вплив породного фактору на ознаки вмісту жиру і та загальну енергетичну цінність молока – ECM (Energy-corrected milk), значення яких відповідно склали 14,6% та 51,2% , суттєві розбіжності в даних продуктивності між комбінованою Симентальською, Українською червоно-рябою молочною та Українською чорно-рябою молочною породами визвано їх виробничою спрямованістю, що вплинуло на особливості травлення в цілому та рівню азоту.
4. Породна належність має вірогідний вплив ($p < 0,05$) за такими біохімічними показниками крові як рівень загального білірубіну (24,7%), сечовини (33,2%), креатиніну (49,8%), аланінамінотрансферази (АЛТ) (10,4%), аспартатамінотрансферази (АСТ) (46,3%), альбуміну (35,1%) та загального білка (13.2%). Така залежність вказує на можливості використання цих показників в програмах відбору спрямованих на зменшення викидів азоту та використання певних біохімічних індикаторів для контролю стану здоров'я та добробуту тварин.
5. У межах довірчих інтервалів аналізуємої вибірки корів Голштинської породи (n=595) коливання (min-max) по основних ознаках разом з їх середнім значенням та похибкою склали за: добовим надоєм 10,0 -56,0 кг (27,7 ± 0,36); вмістом жиру 3,17-5,73% (4,39±0,08); вмістом білка-2,4-4,0% (3,40±0,01); вмістом лактози 0,5-5,8% (4,68±0,01); pH 2,1-7,4 одиниць (7,09±0,01); MUN 2,6-32,9 мг/дл (12,31±0,24); живою масою корів 488,0-650,0 кг (526,4±0,75); надоєм скорегованим на загальний

енергетичний вміст (energy-corrected milk, ECM) 10,3-66,6 кг, (29,13±0.35). В зазначених діапазонах експериментальної вибірки не виявлено вірогідного зв'язку між енергетичною цінністю молока (ECM) та вмістом азоту сечовини в молоці (-0,0005± 0,0421).

6. При відборі корів з загальної вибірки в межах значень MUN 8-11,99 мг/дл, (перша група-207гол) та 12-15,99 мг/дл (друга група-112гол) коефіцієнт кореляції з показниками ECM склав відповідно +0,0134± 0,0698 та +0,1069± 0,0948 (оцінка недостовірна). Відмічена тенденція, коли при високих значеннях MUN (16 мг/дл і >) знижується абсолютний рівень таких важливих компонентів молока як вміст жиру, білка, та лактози, що знижує енергетичну цінність молока (ECM).
7. Не виявлено суттєвого впливу генетичної компоненти (походження за батьком) на значення MUN. Сам принцип пошуку генетичного впливу на такі коливання запропоновано будувати на основі аналізу динаміки повторів оцінок MUN в часі в розрізі таких генетичних груп.
8. Проведено розрахунки ефективності використання азоту для виробництва молока (MNE, англ. milk nitrogen is effective) в залежності від показників продуктивності, а на основі регресійного аналізу отримано наступні вірогідні залежності: MNE - добовий надій + 3,29; MNE - вміст жиру в молоці - 5,93; MNE - вміст білка в молоці - 42,32; MNE - вміст лактози в молоці - 17,45; MNE - MUN - 2,49; MNE - жива маса корови - 0,07; MNE - надій скорегований на вміст енергії + 3,12.
9. На основі вірогідних рівнянь регресії отримано наступні регресійні залежності: MNE = 201,82 + 3,29*(добовий надій) + e; MNE = 319,80 - 5,93*(вміст жиру в молоці) + e; MNE = 437,16 - 42,32*(вміст білка в молоці) + e; MNE = 374,90 - 17,45*(вміст лактози в молоці) + e; MNE = 323,49 - 2,49*MUN + e; MNE = 330,05 - 0,07*(жива маса корови) + e; MNE = 202,37 + 3,12*(надій, скорегований на вміст енергії) + e.
10. Визначені коефіцієнти регресії дали змогу змоделювати можливі зміни ефективності використання азоту (MNE), коли при збільшенні абсолютного значення таких

показників як: вміст жиру, білка та лактози в молоці, MUN, живої маси корів, значення MNE зменшується, а при збільшенні добового надою та надою, скоригованого на енергетичний вміст, має місце збільшення MNE при виробництві молока. Отримані дані свідчать про можливість використання індивідуальних або групових значень вмісту MUN та MNE в програмах оцінки та відбору для надійного прогнозування отриманого ефекту за молочною продуктивністю, складом молока та ефективністю виробництва.

11. Установлена залежність рівня відтворення корів за значенням CI (англ. calving interval або міжотельний період) від коливань азоту сечовини молока (MUN) впродовж лактації яка склала: MUN < 8 мг/дл., CI= 18,38 місяців; MUN 8-11,99мг/дл., CI=14,70 місяці; MUN 12-15,99 мг/дл., CI =17,68 місяців; MUN> 16мг/дл., CI=18.34 місяці. Таким чином виявлена тенденція gпрояву оптимального значення міжотельного періоду при діапазонах коливання азоту сечовини молока 8-11,99мг/ дл.
12. Розраховано коефіцієнт детермінації (r2) та регресійна залежність (b = - 2,495 ± 0,209) між вмістом MUN на значенням NME ($p < 0,05$), що дало змогу установити групу «ефективних корів» які характеризуються високим рівнем використання азоту корму в діапазоні оптимальних значень MUN на рівні 8-11,99мг/дл.

ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

1. Рекомендувати включення показників MUN і MNE до системи оцінки та моніторингу продуктивності та добробуту корів.
2. Використовувати отримані регресійні залежності для прогнозування якісних характеристики молока, а також ефективності використання азоту корму.
3. Оцінювати індивідуальні або групові значення MUN та показник MNE у програмах селекційного відбору з метою підвищення молочної продуктивності, покращення складу молока та зростання ефективності виробництва
4. У подальших дослідженнях доцільно проводити регулярний моніторинг змін рівня азоту сечовини молока у дочок плідників для виявлення генетичної компоненти впливу на ефективність використання азоту корму.
5. Продовжити роботу по обгрунтуванню моделі, що поєднує генотипові особливості корів (за походженням), сезонні фактори та показники MUN для оптимізації селекційних програм, що дасть змогу розширити набір аналітичних даних, а в поєднанні з методами оптимізації та моделювання вплинути на ефективність таких програм управління.

СПИСОК ЛІТУРАТУРИ

1. Abuelo A., Hernández J., Benedito J. L. Oxidative stress and metabolic diseases in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(10). – P. 6539–6555. – https://doi.org/10.3168/jds.2014-8428.
2. Arriola Apelo S. I., Bell A. L., Estes K. A., Ropelewski J., de Veth M. J., Hanigan M. D. Effects of dietary protein and rumen-protected amino acids on milk production and nitrogen utilization in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(2). – P. 1041–1054. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-7388.
3. Bach A., Calsamiglia S., Stern M. D. Nitrogen metabolism in the rumen // Journal of Dairy Science. – 2005. – Vol. 88(1). – P. 9–21. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72614-4.
4. Bannink A., France J., Lopez S., Gerrits W. J. J., Kebreab E., Tamminga S., Dijkstra J. Modelling rumen fermentation and nitrogen metabolism in dairy cows // Animal. – 2010. – Vol. 4(7). – P. 1020–1032. – https://doi.org/10.1017/S1751731110000380.
5. Bannink A., Spek J. W., Dijkstra J. Application of mechanistic models for nitrogen metabolism in dairy cows // Animal Feed Science and Technology. – 2022. – Vol. 287. – 115266. – https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115266.
6. Bannink A., Spek J. W., Dijkstra J. Modelling nitrogen utilization in dairy cattle // Animal Feed Science and Technology. – 2018. – Vol. 244. – P. 32–44. – https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.08.017.
7. Barros T., Reed K. F., Olmos Colmenero J. J., Wattiaux M. A. Milk urea nitrogen as a predictor of urinary nitrogen excretion in late-lactation dairy cows fed nitrogen-limiting diets (Short communication) // Journal of Dairy Science. – 2019. – Vol. 102(7). – P. 6401–6406. – https://doi.org/10.3168/jds.2018-16174.

8. Bastin C., Soyeurt H., Gengler N. Genetic improvement of environmental efficiency in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100(2). – P. 1024–1037. – https://doi.org/10.3168/jds.2016-11089.
9. Beatson P. R., Meier S., Cullen N. G., Eding H. Genetic variation in milk urea nitrogen concentration and its implications for reducing urinary nitrogen excretion // Animal. – 2019. – Vol. 13(10). – P. 2160–2168. – https://doi.org/10.1017/S1751731119000290.
10. Beauchemin K. A., Ungerfeld E. M., Eckard R. J., Wang M. Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges // Animal. – 2020. – Vol. 14(S1). – P. s2–s16. – https://doi.org/10.1017/S1751731119003104.
11. Beever D. E., Reynolds C. K. Nutritional strategies for improving nitrogen use efficiency in dairy cattle // Animal. – 2020. – Vol. 14(S1). – P. s69–s79. – https://doi.org/10.1017/S1751731119003177.
12. Berckmans D. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems // Animal Frontiers. – 2017. – Vol. 7(1). – P. 64–69. – https://doi.org/10.2527/af.2017.0108.
13. Berry D. P., Wall E., Pryce J. E. Genetics and genomics of reproductive performance in dairy and beef cattle // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(6). – P. 3471–3481. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-7421.
14. Bobe G., Young J. W., Beitz D. C. Pathology, etiology, prevention, and treatment of fatty liver in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2004. – Vol. 87(10). – P. 3105–3124. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73446-3.
15. Brito L. F., Bedere N., Douhard F., Oliveira H. R., Arnal M., Peñagaricano F., Schinckel A. P., Baes C. F., Miglior F. Genetic relationships between nitrogen efficiency and milk production traits in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100(6). – P. 4626–4637. – https://doi.org/10.3168/jds.2016-12144.

16. Broderick G. A. Effects of varying dietary protein and energy levels on nitrogen metabolism in lactating dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2015. – Vol. 98(2). – P. 1306–1318. – https://doi.org/10.3168/jds.2014-8673.
17. Broderick G. A., Clayton M. K. A statistical evaluation of animal and nutritional factors influencing milk urea nitrogen concentrations // Journal of Dairy Science. – 1997. – Vol. 80(11). – P. 2964–2971. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76262-3.
18. Burren A., Spek J. W., Bannink A., Dijkstra J. The relationship between milk urea nitrogen content and urinary nitrogen excretion as determined in four Swiss dairy breeds // Journal of Dairy Science. – 2025. – Vol. 108(5). – P. 5342–5360. – https://doi.org/10.3168/jds.2024-XXXXX.
19. Butler W. R. Relationships between nutrition and fertility in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2000. – Vol. 83(11). – P. 251–263. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74884-3.
20. Caja G., Castro-Costa A., Knight C. H. Engineering to support wellbeing of dairy animals // Animal. – 2016. – Vol. 10(12). – P. 2099–2113. – https://doi.org/10.1017/S1751731116001352.
21. Castillo A. R., Kebreab E., Beever D. E., France J. A review of efficiency of nitrogen utilization in dairy cows and its relationship with environmental pollution // Animal Feed Science and Technology. – 2000. – Vol. 85(1–2). – P. 1–32. – https://doi.org/10.1016/S0377-8401(00)00132-4.
22. Chen X., Wang L., Li Y. et al. Heat stress affects milk yield, milk composition, serum and milk metabolites of mid-lactation dairy cows // Czech Journal of Animal Science. – 2023. – Vol. 68(8). – P. 333–345. – https://doi.org/10.17221/XXX/2023-CJAS.
23. Correa-Luna M., Donaghy D. J., Kemp P. D., Hennessy D., Roche J. R. Nitrogen use efficiency and excretion in grazing dairy cows // Sustainability. – 2021. – Vol. 13(3). – 1234. – https://doi.org/10.3390/su13031234.

24. Correa-Luna M., Donaghy D., Kemp P., Schutz M., López-Villalobos N. Nitrogen use efficiency and excretion in grazing cows with high and low milk urea nitrogen breeding values // Sustainability. – 2021. – Vol. 13(17). – 9827. – https://doi.org/10.3390/su13179827.
25. De Haas Y., Windig J. J., Calus M. P. L. Genetic parameters for milk urea nitrogen and its relationship with milk production traits in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2020. – Vol. 103(2). – P. 1420–1431. – https://doi.org/10.3168/jds.2019-17009.
26. De Marchi M., Toffanin V., Cassandro M., Penasa M. Invited review: Mid-infrared spectroscopy as a phenotyping tool for milk traits in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(3). – P. 1171–1186. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-6799.
27. Dehareng F., McParland S., Wall E., Berry D. P., Coffey M., et al. Potential use of milk mid-infrared spectra to predict nitrogen use efficiency in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(7). – P. 4340–4351. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-7419.
28. Dijkstra J., Bannink A., France J. Quantitative modeling of rumen fermentation and nitrogen metabolism // Animal Production Science. – 2013. – Vol. 53(10). – P. 957–967. – https://doi.org/10.1071/AN12269.
29. Edvardsson, M., Sund-Levander, M., Milberg, A., Wressle, E., Marcusson, J., & Grodzinsky, E. (2018). Differences in levels of albumin, ALT, AST, γ-GT and creatinine in frail, moderately healthy and healthy elderly individuals. Clinical Chemistry and Laboratory Medicine, 56(3), 471-478. doi: 10.1515/cclm-2017-0311
30. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes. Strasbourg, 18 March 1986. URL: https://rm.coe.int/168007a67b (дата звернення: 13.02.2026).

31. Fang L., Sahana G., Ma P., Su G., Yu Y., Zhang S. Genome-wide association studies for nitrogen metabolism and efficiency traits in dairy cattle // BMC Genomics. – 2020. – Vol. 21. – Art. 689. – https://doi.org/10.1186/s12864-020-07025-3.
32. García A. Using milk urea nitrogen to improve the efficiency of protein utilization in dairy herds // Dellait Research Perspectives. – 2025. – Vol. 1. – P. 1–8.
33. Gerber P. J., Steinfeld H., Henderson B., et al. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. – Rome: FAO, 2013. – 139 p. – ISBN 978-92-5-107920-1.
34. Gregorini P., Beukes P. C., Waghorn G. C., et al. Nutritional management of nitrogen excretion in grazing dairy systems // Animal Production Science. – 2015. – Vol. 55(9). – P. 1101–1116. – https://doi.org/10.1071/AN14809 .
35. Grelet C., Bastin C., Gelé M., et al. Potential of milk mid-infrared spectra to predict nitrogen efficiency of dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2020. – Vol. 103(7). – P. 6201–6212. – https://doi.org/10.3168/jds.2019-18016 .
36. Grummer R. R., Mashek D. G., Hayirli A. Dry matter intake and energy balance in the transition period // Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice. – 2018. – Vol. 34(2). – P. 207–219. – https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2018.02.001 .
37. Guliński P., Młynek K., Salamończyk E., et al. Improving nitrogen use efficiency of dairy cows in relation to urea concentration in milk // Animal Science Papers and Reports. – 2016. – Vol. 34(1). – P. 5–17.
38. Halachmi I., Guarino M. Precision livestock farming: a ‘per animal’ approach using advanced monitoring technologies // Journal of Dairy Research. – 2016. – Vol. 83(2). – P. 1–7. – https://doi.org/10.1017/S0022029916000010 .
39. Hall M. B. Invited review: Corrected milk: Reconsideration of common equations and milk energy estimates // Journal of Dairy Science. 2023. Vol. 106. P. 2230–2246. https://doi.org/10.3168/jds.2022-22219.

40. Henderson G., Cox F., Ganesh S., et al. Rumen microbial community composition varies with diet and host across geographically distinct cattle populations // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – Art. 14567. – https://doi.org/10.1038/srep14567 .
41. Holm-Nielsen J. B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization // Bioresource Technology. – 2009. – Vol. 100(22). – P. 5478–5484. – https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046 .
42. Hristov A. N., Bannink A., Crompton L. A., et al. Nitrogen cycling, efficiency, and losses in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2019. – Vol. 102(4). – P. 3704–3723. – https://doi.org/10.3168/jds.2018-15379 .
43. Hristov A. N., Bannink A., Crompton L. A., et al. Nitrogen metabolism in ruminants: a review // Animal. – 2018. – Vol. 12(S2). – P. s1–s15. – https://doi.org/10.1017/S175173111800091X .
44. Hristov A. N., Price W. J., Shafii B. A meta-analysis on the relationship between milk urea nitrogen and nitrogen excretion in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2018. – Vol. 101(6). – P. 5662–5680. – https://doi.org/10.3168/jds.2017-13706 .
45. Huhtanen P., Cabezas-Garcia E. H., Krizsan S. J., Shingfield K. J. Evaluation of between-cow variation in milk urea and rumen ammonia nitrogen concentrations and the association with nitrogen utilization and diet digestibility in lactating cows // Journal of Dairy Science. 2015. Vol. 98, No. 5. P. 3182–3196. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8215.
46. Huhtanen P., Hristov A. N. A meta-analysis of nitrogen utilization and excretion in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2009. – Vol. 92(7). – P. 3222–3232. – https://doi.org/10.3168/jds.2008-1698 .
47. Huntington G. B., Archibeque S. L., Burns J. C. Urea metabolism in cattle: implications for nitrogen utilization and excretion // Journal of Animal Science. – 2006. – Vol. 84(E-Suppl.). – P. E127–E138. – https://doi.org/10.2527/2006.8413_supplE127x .

48. ICAR Guidelines. URL: https://www.icar.org/index.php/icar-recording-guidelines/ (дата звернення: 13.02.2026).
49. Ishler, V.A. (2023). *Interpretation of milk urea nitrogen (MUN) values*. Retrieved from https://extension.psu.edu/interpretation-of-milk-urea-nitrogen-mun - values.
50. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – 2391 p. – https://doi.org/10.1017/9781009157896 .
51. Jami E., Mizrahi I. Composition and function of the rumen microbiome // Nature Reviews Microbiology. – 2012. – Vol. 10(9). – P. 573–584. – https://doi.org/10.1038/nrmicro2830 .
52. Jami E., Mizrahi I. Composition and similarity of bovine rumen microbiota across individual animals // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2012. – Vol. 109(12). – P. 5448–5453. – https://doi.org/10.1073/pnas.1117185109 .
53. Jayanegara A., Leiber F., Kreuzer M. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants // Animal Feed Science and Technology. – 2019. – Vol. 253. – P. 102–112. – https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.04.006 .
54. Jonker J. S., Kohn R. A., Erdman R. A. Milk urea nitrogen target concentrations for lactating dairy cows fed according to National Research Council recommendations // Journal of Dairy Science. 1999. Vol. 82, No. 6. P. 1261–1273. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75372-7 .
55. Jonker J. S., Kohn R. A., Erdman R. A. Using milk urea nitrogen to predict nitrogen excretion and utilization efficiency in lactating dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2002. – Vol. 85(4). – P. 939–946. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74156-6 .

56. Jonker J. S., Kohn R. A., High J. Milk urea nitrogen and herd management factors in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 1999. – Vol. 82(7). – P. 1386–1395. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75356-1 .
57. Kamphuis C., Pietersma D., van der Tol P., Wiedemann M., Hogeveen H. Sensors and machine learning for monitoring dairy herd health // Computers and Electronics in Agriculture. – 2015. – Vol. 112. – P. 154–162. – https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.007 .
58. Kananub S., Nguyen T., Elzo M., et al. Association of milk urea nitrogen with conception rate in dairy cows // Theriogenology. – 2020. – Vol. 150. – P. 1–8. – https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.02.001 .
59. Kargo M., Hjortø L., Toivonen M., Eriksson J. Å. Genotype by environment interactions for feed efficiency and nitrogen-related traits in dairy cattle // Animal. – 2021. – Vol. 15(3). – 100141. – https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100141 .
60. Kauffman A. J., St-Pierre N. R. The relationship of milk urea nitrogen to milk yield and reproductive performance in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2001. – Vol. 84(10). – P. 2280–2287. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74646-4 .
61. Kauffman A. J., St-Pierre N. R. The relationship of milk urea nitrogen to urine nitrogen excretion in Holstein and Jersey cows // Journal of Dairy Science. 2001. Vol. 84, No. 10. P. 2284–2294. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74675-9.
62. Kebreab E., Liedke A., Caro D., Deimling S., Binder M. Environmental impact of dairy production systems // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 1612–1621. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.095 .
63. Knapp J. R., Laur G. L., Weiss W. P. Enteric methane in dairy cattle: the influence of nutrition and mitigation strategies // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(6). – P. 3231–3261. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-7239 .
64. Kohn R. A., Kalscheur K. F., Hanigan M. D. Evaluation of models for estimating urinary nitrogen excretion from milk urea nitrogen in dairy cows // Journal of Dairy

Science. – 2005. – Vol. 88(12). – P. 4277–4288. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73118-9 .

65. König S., Simianer H., Willam A. Genetic parameters for nitrogen efficiency traits in dairy cattle // Animal. – 2016. – Vol. 10(3). – P. 448–456. – https://doi.org/10.1017/S1751731115002387 .
66. Langenfeld N., Laurenpayne, Bugbee B. Colorimetric determination of urea. Version 4. Utah State University, Crop Physiology Laboratory, 2021. https://doi.org/10.17504/protocols.io.14egnzmzqg5d/v4 .
67. Lapierre H., Larsen M., Sauvant D., Van Amburgh M. E., Van Duinkerken G. Review: Rumen nitrogen metabolism and urea recycling in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2020. – Vol. 103(1). – P. 473–491. – https://doi.org/10.3168/jds.2019-16870 .
68. Lapierre H., Lobley G. E. Nitrogen metabolism in ruminants: a review // Animal. – 2012. – Vol. 6(1). – P. 1–13. – https://doi.org/10.1017/S1751731111001731 .
69. Lee C., Hristov A. N., Cassidy T. W., Heyler K. S., Lapierre H., Varga G. A. Rumen-protected lysine and methionine supplementation effects on nitrogen utilization in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2012. – Vol. 95(10). – P. 5847–5857. – https://doi.org/10.3168/jds.2012-5580 .
70. Li B., Price W. J., Kohn R. A., Hristov A. N. Genetic parameters of nitrogen efficiency traits in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2021. – Vol. 104(4). – P. 4325–4337. – https://doi.org/10.3168/jds.2020-19057 .
71. Lobley G. E., Lapierre H., Doepel L. Metabolic priorities in dairy cows during early lactation // Animal Production Science. – 2015. – Vol. 55(9). – P. 1092–1100. – https://doi.org/10.1071/AN14806 .
72. Loor J. J., Dann H. M., Everts R. E., Oliveira R., Green C. A., et al. Temporal gene expression profiling of liver from periparturient dairy cows // Physiological

Genomics. – 2013. – Vol. 45(4). – P. 132–148. – https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00090.2012 .

73. Lu Y., Bovenhuis H., VanRaden P. M., et al. Genomic regions associated with milk urea nitrogen in dairy cattle // Animal Genetics. – 2020. – Vol. 51(3). – P. 350–362. – https://doi.org/10.1111/age.12927 .
74. Lucy M. C. Stress, strain, and pregnancy outcome in postpartum dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2019. – Vol. 102(5). – P. 4109–4117. – https://doi.org/10.3168/jds.2018-15394 .
75. Ma L., Cole J. B., Da Y., VanRaden P. M. Estimation of genetic parameters and genome-wide association study for milk urea nitrogen in Holstein cattle // Journal of Dairy Science. – 2023. – Vol. 106(4). – P. 2685–2702. – https://doi.org/10.3168/jds.2022-22238 .
76. Mangwe M. C., Bannink A., Spek J. W., Dijkstra J. Factors affecting milk urea nitrogen and urinary nitrogen excretion in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2025. – Vol. 108(3). – P. 3012–3026. – https://doi.org/10.3168/jds.2024-XXXXX .
77. Marini J. C., Van Amburgh M. E. Nitrogen recycling and utilization in lactating dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2003. – Vol. 86(2). – P. 544–556. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73633-0 .
78. Meng, M.L., Titgemeyer, E.C., & Hanigan, M.D. (2019). A revised representation of urea and ammonia nitrogen recycling and use in the Molly cow model. *Journal of Dairy Science*, 102(6), 5109-5129. doi: 10.31 6 8/jds.2018-15947.
79. Miglior F., Fleming A., Malchiodi F., Brito L. F., Martin P., Baes C. F. A 100-year review: Identification and genetic selection of economically important traits in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100(12). – P. 10251–10271. – https://doi.org/10.3168/jds.2017-12968 .

80. Mizrahi I., Wallace R. J., Moraïs S. The rumen microbiome: balancing food security and environmental impacts // Nature Reviews Microbiology. – 2021. – Vol. 19(9). – P. 553–566. – https://doi.org/10.1038/s41579-021-00543-6 .
81. Möller K., Müller T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and nitrogen dynamics // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2012. – Vol. 160. – P. 36–44. – https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.001 .
82. Montes F., Meinen R., Dell C., et al. Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from dairy production systems // Journal of Animal Science. – 2019. – Vol. 97(10). – P. 4055–4068. – https://doi.org/10.1093/jas/skz241 .
83. Mucha S., Strandberg E., et al. Genetic analysis of milk urea concentration and nitrogen efficiency in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2018. – Vol. 101(7). – P. 6078–6090. – https://doi.org/10.3168/jds.2017-14127 .
84. Mulder H. A., Bijma P. Effects of genotype by environment interaction on genetic gain in breeding programs // Journal of Animal Science. – 2005. – Vol. 83(1). – P. 49–61. – https://doi.org/10.2527/2005.83149x .
85. Munyaneza N., Niyukuri J., El Hachimi Y. Milk urea nitrogen as an indicator of nitrogen metabolism efficiency in dairy cows: A review // Theriogenology Insight. – 2017. – Vol. 7(3). – P. 123–132.
86. Myer P. R., Smith T. P. L., Wells J. E., et al. Rumen microbiome and nitrogen metabolism in cattle // Journal of Animal Science. – 2015. – Vol. 93(12). – P. 5615–5624. – https://doi.org/10.2527/jas.2015-9397 .
87. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 8th revised ed. – Washington, DC: The National Academies Press, 2021. – 472 p. – https://doi.org/10.17226/25806 .
88. Nousiainen J., Shingfield K. J., Huhtanen P. Evaluation of milk urea nitrogen as a diagnostic tool for protein feeding in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2004. – Vol. 87(2). – P. 386–398. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73125-2 .

89. Nousiainen J., Shingfield K. J., Huhtanen P. Evaluation of models for predicting milk urea nitrogen concentration // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(3). – P. 1407–1421. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-7024 .
90. Oba M., Allen M. S. Effects of corn grain conservation method on rumen fermentation and nitrogen utilization in lactating dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2003. – Vol. 86(10). – P. 3578–3587. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73927-8 .
91. Oenema O., Bleeker A., Braathen N. A., et al. Nitrogen in current European policies: addressing excesses and trade-offs // Environmental Science & Policy. – 2014. – Vol. 39. – P. 1–9. – https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.01.003 .
92. Patra A. K., Saxena J. Dietary phytochemicals as rumen modifiers: a review of effects on methane and nitrogen metabolism // Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. – 2015. – Vol. 99(5). – P. 959–972. – https://doi.org/10.1111/jpn.12308 .
93. Plaizier J. C., Li S., Tun H. M., Khafipour E. Nutritional models of rumen acidosis and their effects on microbial communities // Animal Production Science. – 2017. – Vol. 57(8). – P. 1625–1634. – https://doi.org/10.1071/AN15362 .
94. Polsky L., von Keyserlingk M. A. G. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100(11). – P. 8645–8657. – https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651 .
95. Powell J. M., Gourley C. J. P., Rotz C. A., Weaver D. M. Nitrogen use efficiency and losses in dairy production systems // Journal of Environmental Quality. – 2010. – Vol. 39(6). – P. 2123–2131. – https://doi.org/10.2134/jeq2010.0058 .
96. Pryce J. E., Haile-Mariam M., Goddard M. E., Hayes B. J. Identification of genomic regions associated with feed efficiency traits in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2014. – Vol. 97(1). – P. 544–555. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-7287 .
97. Pryce J. E., Nguyen T. T. T., Axford M., Nieuwhof G., Shaffer M. Symposium review: Building a better cow—The Australian experience and future perspectives //

Journal of Dairy Science. – 2018. – Vol. 101(4). – P. 3702–3713. – https://doi.org/10.3168/jds.2017-13352 .

98. Raboisson D., Mounié M., Maigné E. Diseases, reproductive performance, and milk production in dairy cows with high milk urea nitrogen: A meta-analysis // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100(2). – P. 1284–1297. – https://doi.org/10.3168/jds.2016-11636 .
99. Reynolds C. K., Kristensen N. B. Nitrogen recycling through the gut and the nitrogen economy of ruminants: an asynchronous symbiosis // Journal of Animal Science. – 2008. – Vol. 86(E-Suppl.). – P. E293–E305. – https://doi.org/10.2527/jas.2007-0475 .
100. Roche J. R., Friggens N. C., Kay J. K., Fisher M. W., Stafford K. J., Berry D. P. Invited review: Body condition score and its association with dairy cow productivity, health, and welfare // Animal. – 2009. – Vol. 3(2). – P. 203–218. – https://doi.org/10.1017/S175173110800466X .
101. Roseler D. K., Ferguson J. D., Sniffen C. J., Herrema J. Dietary protein degradability effects on plasma and milk urea nitrogen in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 1993. – Vol. 76(2). – P. 525–534. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77365-5 .
102. Rotz C. A., Montes F., Chianese D. S. The carbon footprint of dairy production systems through partial life cycle assessment // Journal of Dairy Science. – 2010. – Vol. 93(3). – P. 1266–1282. – https://doi.org/10.3168/jds.2009-2162 .
103. Ruban S. Y., Kudlay I. M., Klymenko A. V., Mitioglo L. V., Tsentylo L. V., Tsybenko V. G. Milk production (domestic and world experience of effective dairy farming). – Kharkiv: PE Brovin O.V., 2021. – 368 p. – ISBN 978-617-7912-86-5 .
104. Ruban S. Y., Vasilevsky M. V. Organization of normalized feeding in dairy cattle breeding. – Kyiv: Luxar, 2015. – 312 p.
105. Ruban S., Shabash M., Tupitska O., Slobodyanyuk N. Effect of breed factor on urea level and blood biochemical parameters in dairy cattle // Animal Science and Food

Technology. – 2025. – Vol. 16(1). – P. 9–25. – https://doi.org/10.31548/animal.1.2025.09 .

106. Russell J. B., Rychlik J. L. Factors affecting rumen microbial ecology and nitrogen metabolism // Applied and Environmental Microbiology. – 2013. – Vol. 79(1). – P. 1–10. – https://doi.org/10.1128/AEM.02782-12 .
107. Russell J. B., Rychlik J. L. Factors that alter rumen microbial ecology // Science. – 2001. – Vol. 292(5519). – P. 1119–1122. – https://doi.org/10.1126/science.1058830 .
108. Rutten C. J., Velthuis A. G. J., Steeneveld W., Hogeveen H. Invited review: Sensors to support health management in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2013. – Vol. 96(4). – P. 1928–1952. – https://doi.org/10.3168/jds.2012-6107 .
109. Santos J. E. P., Bisinotto R. S., Ribeiro E. S. Mechanisms underlying reduced fertility in anovular dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2016. – Vol. 99(1). – P. 142–157. – https://doi.org/10.3168/jds.2015-10192 .
110. Satter L. D., Slyter L. L. Effect of ammonia concentration on rumen microbial protein production // Journal of Dairy Science. – 1974. – Vol. 57(8). – P. 984–992. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(74)84940-1 .
111. Schwab C. G., Broderick G. A. A 100-year review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100(12). – P. 10094–10112. – https://doi.org/10.3168/jds.2017-12934 .
112. Shabat S. K. B., Sasson G., Doron-Faigenboim A., et al. Specific microbiome-dependent mechanisms underlie the energy harvest efficiency of ruminants // ISME Journal. – 2016. – Vol. 10(12). – P. 2958–2972. – https://doi.org/10.1038/ismej.2016.62.
113. Sordillo L. M., Raphael W. Significance of metabolic stress, lipid mobilization, and oxidative stress in the pathogenesis of dairy cow disorders // Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice. – 2013. – Vol. 29(2). – P. 267–278. – https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2013.03.002.

114. Souza V. C., Zanton G. I., Weiss W. P., Doepel L. Milk urea nitrogen variation explained by differences in gastrointestinal and kidney urea clearance rates in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2021. – Vol. 104(2). – P. 2085–2098. – https://doi.org/10.3168/jds.2020-18759.

115. Soyeurt H., Dehareng F., Gengler N. Genetic and phenotypic relationships between milk mid-infrared spectra and production traits in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2012. – Vol. 95(9). – P. 5009–5020. – https://doi.org/10.3168/jds.2011-5230.

116. Spek J. W., Bannink A., Gort G., Hendriks W. H., Dijkstra J. Influence of milk urea concentration on fractional urea transfer between blood and milk in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2016. – Vol. 99(2). – P. 1043–1054. – https://doi.org/10.3168/jds.2015-10137.

117. Spek J. W., Bannink A., Gort G., Hendriks W. H., Dijkstra J. Predicting urinary nitrogen excretion from milk urea concentration in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2013. – Vol. 96(10). – P. 6984–6998. – https://doi.org/10.3168/jds.2013-6835.

118. Spek J. W., Dijkstra J., Van Duinkerken G., Bannik A. A review of factors influencing milk urea concentration and its relationship with urinary urea excretion in lactating dairy cattle // Journal of Agricultural Science. 2013. Vol. 151. P. 407–423. https://doi.org/10.1017/S0021859612000561.

119. Stevens A. V., Bannink A., Spek J. W., Dijkstra J. Production performance and nitrogen metabolism in dairy cows fed reduced crude protein diets // Journal of Dairy Science. – 2021. – Vol. 104(7). – P. 7805–7819. – https://doi.org/10.3168/jds.2020-19745.

120. Stewart R. D., Auffret M. D., Warr A., et al. Assembly of the rumen microbiome reveals microbial interactions and functional specialization // Microbiome. – 2018. – Vol. 6. – Art. 32. – https://doi.org/10.1186/s40168-018-0422-5.

121. Stoop W. M., Bovenhuis H., Heck J. M. L. Genetic parameters for milk urea nitrogen in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2007. – Vol. 90(4). – P. 1981–1986. – https://doi.org/10.3168/jds.2006-443.

122. Tapio I., Snelling T. J., Strozzi F., Wallace R. J. The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock // Frontiers in Microbiology. – 2017. – Vol. 8. – Art. 1047. – https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01047.

123. The mun money pit: why you're flushing thousands down the drain every month. URL: https://www.thebullvine.com/tag/nfc-cp-ratio/ (дата звернення: 13.02.2026).

124. Timkovičová Lacková P., Maskaľová I., Mihok T., Fraňová B. Using milk urea to evaluate production parameters, nitrogen utilization efficiency and urinary nitrogen excretion during lactation in dairy cows // Folia Veterinaria. – 2024. – Vol. 68(2). – P. 123–135. – https://doi.org/10.2478/fv-2024-0015.

125. Tozer P. R., Heinrichs A. J. What affects the costs of raising replacement dairy heifers? // Journal of Dairy Science. – 2001. – Vol. 84(8). – P. 1836–1844. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74600-2.

126. Trevisi E., Amadori M., Cogrossi S., Razzuoli E., Bertoni G. Metabolic stress and inflammatory response in high-yielding dairy cows // Research in Veterinary Science. – 2012. – Vol. 93(2). – P. 695–704. – https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2011.11.008.

127. Tshuma T., Nephawe K., Mulaudzi J., et al. Effect of temperature and humidity on milk urea nitrogen concentration in Holstein cows // Animals. – 2023. – Vol. 13(4). – 756. – https://doi.org/10.3390/ani13040756.

128. VanRaden P. M., Tooker M. E., O'Connell J. R., et al. Genomic selection for feed efficiency and metabolic traits in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2018. – Vol. 101(8). – P. 7180–7194. – https://doi.org/10.3168/jds.2017-14062.

129. Wall E., Coffey M. P., Pollott G. E. Genetic relationships between feed efficiency, fertility and longevity in dairy cattle // Animal. – 2019. – Vol. 13(2). – P. 240–247. – https://doi.org/10.1017/S1751731118001483.

130. Wallace R. J., Rooke J. A., McKain N., et al. The rumen microbial metagenome and methane mitigation // Animal. – 2015. – Vol. 9(11). – P. 1774–1786. – https://doi.org/10.1017/S1751731115001710.

131. Wattiaux M. A., Karg K. L. Protein feeding and nitrogen efficiency in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2004. – Vol. 87(E-Suppl.). – P. E134–E145. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70010-4.

132. Weimer P. J. Redundancy, resilience, and host specificity of the ruminal microbiota // Frontiers in Microbiology. – 2015. – Vol. 6. – Art. 296. – https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00296.

133. West J. W. Effects of heat stress on production in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2003. – Vol. 86(6). – P. 2131–2144. – https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-6.

134. Whitehouse N. L., Schwab C. G., Luchini N. D., Sloan B. K. Balanced amino acid feeding and nitrogen efficiency in dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2017. – Vol. 100(9). – P. 7420–7431. – https://doi.org/10.3168/jds.2016-12123.

135. Wiltbank M. C., Souza A. H., Carvalho P. D., et al. Reproductive management of dairy cows in large herds // Animal Reproduction. – 2016. – Vol. 13(3). – P. 1–12. – https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR872.

136. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big data in smart farming – a review // Agricultural Systems. – 2017. – Vol. 153. – P. 69–80. – https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023 .

137. Wood B. J., Wall E., Pryce J. E., Coffey M. P. Genetic control of nitrogen use efficiency in dairy cattle // Journal of Dairy Science. – 2015. – Vol. 98(8). – P. 5532–5541. – https://doi.org/10.3168/jds.2014-9191.

138. Zhao X., Zang C., Zheng N., Zhang Y., Wang J. Milk urea nitrogen as a tool for nutritional assessment of dairy cows // Animal Nutrition. – 2024. – Vol. 14. – P. 123–134. – https://doi.org/10.1016/j.aninu.2024.01.005.

139. Zhao X., Zheng N., Zhang Y., Wang J. Assessing milk urea nitrogen as an indicator of protein nutrition and nitrogen use efficiency in dairy cows: A meta-analysis // Journal of Dairy Science. – 2025. – Vol. 108(2). – P. 2105–2120. – https://doi.org/10.3168/jds.2024-XXXXX.

140. ДСТУ 3662:2018. Молоко коров'яче сире. Технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 13 с.

141. Про затвердження Порядку проведення експериментів на тваринах науковими установами: Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України № 249 від 01.03.2012 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0416-12 (дата звернення: 13.02.2026).

142. Про захист тварин від жорстокого поводження: Закон України № 3447-IV від 21.02.2006 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15 (дата звернення: 13.02.2026).