



EXPANDING THE CAPABILITIES OF THE MODEL FOR PREDICTING THE EFFICIENCY OF NITROGEN UTILISATION BY DAIRY COWS BASED ON THE INTERACTION BETWEEN GENOTYPE AND ENVIRONMENT

S.Yu. Ruban, M.L. Shabash, O.M. Tupitska

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID

S.Yu. Ruban: <https://orcid.org/0000-0002-8114-3665>

M.L. Shabash: <https://orcid.org/0009-0000-8452-2823>

O.M. Tupitska: <https://orcid.org/0000-0001-9067-9173>

E-mail: rubansy@gmail.com

Abstract. The aim of this study is to establish general frameworks for assessing genotype–environment interactions ($G \times E$) and to develop approaches for determining the genetic influence on variations in the milk nitrogen efficiency index (MNE). According to research conducted on Holstein cows, variability, correlation, and regression dependence were established between milk yield, the main components of milk (fat, protein, and lactose content), milk urea nitrogen (MUN) levels, and milk nitrogen efficiency (MNE). A negative correlation was found between MNE values and milk fat content ($-0.1980 \pm 0.0412^*$), protein ($-0.2234 \pm 0.0410^*$), lactose ($-0.1719 \pm 0.0414^*$), and MUN ($-0.4489 \pm 0.0376^*$). A positive correlation ($0.8449 \pm 0.0225^*$) was found between milk yield and MNE for milk production. A regression dependence of the MNE level was determined, which is confirmed by the coefficient of determination (r^2): daily milk yield ($r^2 = 0.71$); milk yield adjusted for energy content ($r^2 = 0.63$); MUN level ($r^2 = 0.20$). No significant influence of the genetic component on the MNE value was established. In this regard, a working hypothesis has been established a priori regarding the feasibility of using the dynamics of MUN changes at different stages of lactation in cows as a criterion for the rate of these changes over time, which will allow identifying the possible influence of the genetic component on the MNE indicator. Approaches to assessing genotype–by–environment interactions ($G \times E$) can serve as a working model. Emphasis is placed on the need to conduct such assessments both for ‘optimal’ MUN values within the range of 8–12 mg/dl and outside these limits, since deviations can affect the health and reproductive performance of cows. The feasibility of using individual or group MUN and MNE values in management programmes, as well as in evaluation and selection systems, is justified in order to reliably predict the effect on milk productivity, health, milk composition and production efficiency.

Key words: *milk urea nitrogen (MUN), energy–corrected milk (ECM), regression analysis, milk nitrogen efficiency (MNE).*

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЗОТУ МОЛОЧНИМИ КОРОВАМИ НА ОСНОВІ ВЗАЄМОДІЇ ГЕНОТИПУ ТА СЕРЕДОВИЩА

С.Ю. Рубан, М.Л. Шабаш, О.М. Тупицька

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна
E-mail: rubansy@gmail.com

Анотація. Метою роботи є обґрунтування загальних схем оцінки взаємодії генотипу та середовища ($G \times E$) і розроблення підходів до визначення генетичного впливу на коливання показника ефективності використання азоту в молоці (MNE). Відповідно до проведених досліджень на коровах голштинської породи встановлено мінливість, кореляційні зв'язки та регресійну залежність між величиною надою, основними компонентами молока (вміст жиру, білка, лактози), рівнем сечовини в молоці (MUN) та ефективністю використання азоту для виробництва молока (MNE, англ. *milk nitrogen efficiency*). Установлено від'ємний кореляційний зв'язок значень MNE із вмістом жиру в молоці ($-0,1980 \pm 0,0412^*$), білка ($-0,2234 \pm 0,0410^*$), лактози ($-0,1719 \pm 0,0414^*$), а також із MUN ($-0,4489 \pm 0,0376^*$). Виявлено позитивний кореляційний зв'язок ($0,8449 \pm 0,0225^*$) між надоєм та MNE для виробництва молока. Визначено регресійну залежність рівня MNE, що підтверджується значенням коефіцієнта детермінації (r^2): добовий надій ($r^2 = 0,71$); надій, скоригований на вміст енергії ($r^2 = 0,63$); рівень MUN ($r^2 = 0,20$). Вірогідного впливу генетичної компоненти на значення MNE не встановлено. У зв'язку з цим *a priori* обґрунтовано робочу гіпотезу щодо доцільності використання динаміки змін MUN на різних фазах лактації корів як критерію швидкості цих змін у часі, що дозволить виявити можливий вплив генетичної компоненти на показник MNE. Робочою моделлю можуть слугувати підходи до оцінки взаємодії генотипу та середовища ($G \times E - genotype-by-environment interactions$). Акцентовано увагу на необхідності проведення таких оцінок як за «оптимальних» значень MUN у межах 8–12 мг/дл, так і поза цими межами, оскільки відхилення можуть впливати на стан здоров'я та рівень відтворення корів. Обґрунтовано доцільність використання індивідуальних або групових значень MUN і MNE у програмах менеджменту, а також у системах оцінки та відбору з метою надійного прогнозування ефекту щодо молочної продуктивності, стану здоров'я, складу молока та ефективності виробництва.

Ключові слова: азот сечовини молока (MUN), молоко, скориговане за енергією (ECM), регресійний аналіз, ефективність використання азоту для виробництва молока (MNE).

Вступ. *Актуальність теми.* Феноміка — міждисциплінарна галузь знань, яка об'єднує біологію, математику та інформаційні технології для аналізу й управління виробничими системами. У молочному скотарстві цей напрям передбачає пошук предикторів — змінних величин, факторів і показників — для аналізу та прогнозування значень або подій.

Розширення та обґрунтування предикторної бази є одним із актуальних напрямів, що дає можливість вирішити коло питань, пов'язаних з ефективністю використання корму (зокрема через ефективність використання азоту), станом здоров'я тварин та їх впливом на екологічний баланс.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання інформаційних систем у молочному скотарстві розкриває можливості коректної та швидкої оцінки складних біологічних та економічних процесів, здійснення прогнозування та прийняття обґрунтованих рішень (Salamone et al., 2022; Saleh et al., 2023; Perneel et al., 2024; Song et al.,

2025). Оцінка ефективності використання корму залишається на найближчу перспективу основним трендом у програмах відбору та управління стадом і дає можливість здешевити виробництво молока за рахунок зменшення виробничих витрат, пов'язаних із забезпеченням кормовим білком (Kondratiuk et al., 2024). За даними Spek et al. (2013), майже 28 % азоту, що споживається молочними коровами з кормом, проходить шлях конверсії в молоко, причому 5 % виводиться у формі небілкового азоту, а решта — як справжній білок. У рубці корів рівень азоту (N) забезпечує відповідний рівень і склад молочної продукції, впливаючи на стан здоров'я та величину втрат N у навколишнє середовище (Ruban & Vasilevsky, 2015; Vorshch, 2023; Hristov et al., 2026). Будучи основним компонентом амінокислот, баланс яких у рубці впливає на синтез мікробного білка, N залишається важливим фактором успішного процесу перетравлення корму та його використання мікробіотою хазяїна. За даними Badhan et al. (2025), більшість енергії та білка постачаються жуйним у результаті ферментації мікробіомом рубця, що відіграє ключову роль у визначенні ефективності годівлі та викидів метану (CH₄). Для оцінки рівня N у рубці використовують складні біохімічні методи, включаючи вимірювання концентрації аміаку, синтезу мікробного білка та балансу азоту в рубці. Souza et al. (2018) довели, що перетравність знижується зі збільшенням денної норми споживання сухої речовини — DMI (*dry matter intake*). Huhtanen et al. (2015) запропонували використовувати MUN, рівень якого залежить від концентрації та споживання сирого протеїну в раціоні. Для цього MUN використовується як біомаркер ефективності використання N для виробництва молока лактуючими коровами, описуючи цей процес комплексним рівнянням — MNE. За даними Souza et al. (2020), Wattiaux et al. (2011), MUN та азот сечовини крові (BUN) корелюють із балансом і виділенням азоту, однак існує також генетична компонента концентрації MUN, яка може бути пов'язана з відмінностями у транспорті сечовини. Було висунуто гіпотезу, що частина варіації концентрації MUN серед корів зумовлена відмінностями у шлунково-кишковому та нирковому кліренсі сечовини. У роботі Ruban et al. (2025) доведено суттєвий вплив фактора породи за такими біохімічними показниками крові, як рівень загального білірубину — 24,7 %, сечовини — 33,2 %, креатиніну — 49,8 %, аланінамінотрансферази — 10,4 %, аспартатамінотрансферази — 46,3 %, альбуміну — 35,1 % та загального білка — 13,2 %. Дослід проводився в однакових умовах утримання та годівлі, але на достатньо «контрастних» між собою породах, таких як українська червоно-ряба молочна, симентальська та українська чорно-ряба молочна. Сучасний погляд на фактор породи як важливий показник генетичного різноманіття передбачає пошук конкретних генетичних детермінант фенотипової дисперсії. Дослідження, проведені в Україні за участю контрастних між собою порід як молочного, так і м'ясного напрямів продуктивності, демонструють залежність біохімічних показників крові та інших характеристик метаболізму від генотипу, плейотропної дії генів залежно від якості та складу кормів і додатково споживаних речовин (Fedota et al., 2022). Також дослідження із залученням лабораторних тварин з генетично детермінованими показниками здоров'я дозволяють не лише встановлювати закономірності впливу споживаних речовин та ксенобіотиків на метаболічні процеси, але й планувати їх доцільне спрямування (Babalyan et al., 2019). Залежність динаміки біохімічних показників крові, печінкових проб у особин із визначеними генотипами від впливу антиметаболітів демонструє загальні біологічні закономірності обміну речовин та енергії у ссавців і дозволяє враховувати їх у програмах відбору (Fedota et al., 2020).

В основному рівень MUN дає уявлення про баланс білка та енергії в раціоні, що робить його корисним параметром для моніторингу адекватності споживання білка та енергії молочними коровами (Ruban & Vasilevsky, 2015). Аналіз і попередні аналітичні звіти Zhao et al. (2025) показують, що концентрація сирого протеїну — CP (*crude protein*) — у раціоні не є єдиним фактором живлення, який впливає на концентрацію MUN. Рівень у раціоні неструктурних вуглеводів — NFC (*non-fiber carbohydrates*), до яких входять цукри, крохмаль і пектин, також відіграє важливу роль. Авторами наведено лінійний регресійний

аналіз для 91 набору експериментальних даних щодо співвідношення NFC/CP у «вхідному» раціоні та концентрації MUN (мг/дл), який становив +0,681. Констатується той факт, що коли рівень MUN перевищує 14 або 16 мг/дл, відповідний вміст CP у раціоні, як правило, перевищує 17 %, що часто призводить до збільшення екскреції N із сечею. Hossein–Zadeh (2024) провів метааналіз із використанням моделі випадкових ефектів для інтеграції оцінок усадковуваності для сечовини молока (MU) та MUN, які були низькими й дорівнювали 0,202 та 0,181 відповідно. Оцінки генетичних кореляцій між MUN та продуктивними ознаками були низькими й коливалися від $-0,039$ між MU та відсотком лактози в молоці до $0,102$ між MUN та виходом молочного білка, а також $-0,070$ між MUN та балом соматичних клітин і $0,357$ між MUN та виходом молочного білка.

Можна констатувати, що знання таких залежностей і зв'язків надає можливості для здійснення прогнозів та прийняття обґрунтованих рішень. Так, Jae–Woo Song et al. (2025) здійснили спробу розробити індивідуальну модель для прогнозування добового надою молока та застосувати її для моніторингу стану здоров'я молочних корів, створивши алгоритм моніторингу в режимі реального часу. De Marchi et al. (2014) та Gengler et al. (2016) довели можливість використання детального аналізу молока як предиктора корельованих фенотипів для ознак, пов'язаних із фізіологічним станом і здоров'ям корови. Nuhtanen et al. (2015) довели, що рівень MUN залежить від концентрації та споживання сирого протеїну в раціоні, тому може бути використаний як біомаркер ефективності використання N для виробництва молока (споживання N/N у молоці; MNE) у лактуючих корів. На основі залишкової дисперсії найкращою моделлю для прогнозування MNE, розробленою на основі набору виробничих даних, була: $MNE \text{ (г/кг)} = 238 + 7,0 \times \text{надій молока (MY; кг/день)} - 0,064 \times MY^2 - 2,7 \times MUN \text{ (мг/дл)} - 0,10 \times \text{маса тіла (кг)}$. Для набору даних потоку, включаючи як MUN, так і концентрацію аміачного азоту в рубці разом із MY у моделі, пояснювалося більше варіації MNE, ніж коли будь-який із термінів використовувався лише з MY. Найкращою моделлю для прогнозування виділення азоту сечовини (UN), розробленою на основі виробничих даних, була: $UN \text{ (г/день)} = -29 + 4,3 \times \text{споживання сухої речовини (кг/день)} + 4,3 \times MUN + 0,14 \times \text{маса тіла}$. За даними Nuhtanen et al. (2015), оцінка фенотипової варіації MUN довела, що варіація MUN серед корів мала менший вплив на MNE порівняно з опублікованими реакціями MUN на концентрацію сирого протеїну в раціоні, що свідчить про те, що більш ретельний контроль складу раціону відповідно до потреб має більший потенціал для покращення MNE та зниження UN на фермі, ніж генетичний відбір.

У даному випадку основним аргументом на користь робочої гіпотези щодо підвищення точності оцінки такого генетичного ефекту можуть слугувати дані Silva Neto et al. (2024), представлені на рис. 1.

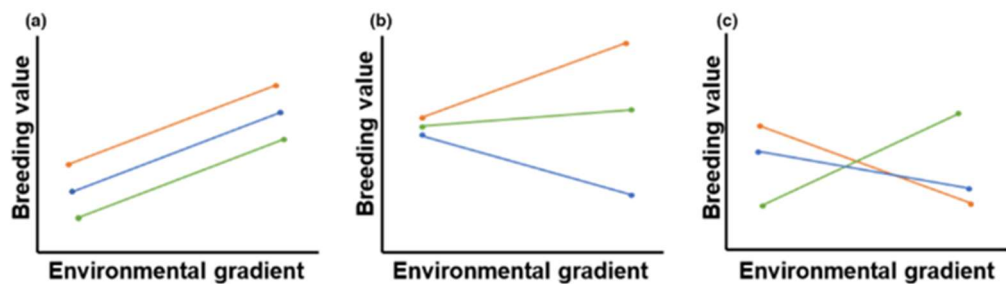


Рис. 1. Вплив змін навколишнього середовища на варіацію генотипу та варіацію племінної цінності

Примітка: (a) – адитивний вплив середовища на фенотипічну відповідь, взаємодія генотипу з середовищем ($G \times E$), незначний; (b) вплив $G \times E$ призводить до змін масштабу значень генетичної цінності; та (c) зміна рангів генетичної цінності у відповідь на зміни навколишнього середовища (Silva Neto et al., 2024)

Попередні висновки про вплив рівня сирого протеїну в раціоні корів на MUN (Huhtanen et al., 2015) можуть свідчити про зміни умов середовища, оскільки в окремих випадках, навіть за ретельної побудови експерименту, корови сепарують корм. Таке вибіркоче споживання окремих компонентів кормосуміші, коли тварини віддають перевагу дрібним частинкам (концентратам) і залишають довгі грубі волокна, формує своєрідний «середовищний ефект», що може впливати на рівень MUN та значення MNE.

Таким чином, важливість взаємодії $G \times E$ стає особливо очевидною при розгляді складних ознак, таких як термостійкість, стійкість до хвороб, репродуктивна продуктивність та ефективність годівлі (Silva Neto et al., 2024).

Нутригенетика та нутригеноміка потребують розроблення нових експериментальних схем для коректного опису генетичного впливу на особливості метаболізму тварин з метою підвищення їх продуктивності та покращення стану здоров'я за одночасного зменшення впливу на навколишнє середовище.

Мета роботи — провести обґрунтування загальних схем оцінки взаємодії $G \times E$ та методології визначення генетичного впливу на коливання MNE.

Завдання дослідження:

– На основі власних досліджень та світового досвіду провести узагальнений аналіз мінливості та взаємозв'язку основних компонентів молока — вмісту жиру, білка, рівня лактози та MUN.

– Встановити залежність MNE від генетичних і середовищних чинників.

– Визначити можливості використання індивідуальних або групових значень MUN та MNE у програмах оцінювання й відбору з метою підвищення молочної продуктивності, покращення складу молока та ефективності виробництва.

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

Матеріал і методи досліджень. Матеріалом для досліджень слугували дані експерименту, проведеного на 595 коровах голштинської породи в умовах Товариства з обмеженою відповідальністю «Агрофірма «Колос» Київської області (Ruban & Shabash, 2025). Під час виконання експериментальних досліджень, наведених у роботі, всі маніпуляції з коровами, залученими до досліджень, проводили з урахуванням основних принципів біоетики відповідно до статті 26 Закону України № 3447 «Про захист тварин від жорстокого поводження» (2006), Європейської конвенції про захист хребетних тварин, що використовуються для експериментальних та інших наукових цілей (1986), та Порядку проведення науковими установами дослідів і експериментів на тваринах (2012). Годівлю здійснювали з використанням загально змішаного раціону – TMR (від англ. Total Mixed Rations), який відповідав прийнятим нормам *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition* (2001).

Під час проведення експерименту співвідношення NFC/CP коливалося від 2,15 до 3,60, що зазвичай є бажаним для підтримання оптимального рівня MUN у молоці (2025). Відповідно до прийнятих норм, рівень NFC у TMR визначали шляхом віднімання частки інших компонентів раціону (у відсотках за сухою речовиною) від 100 %.

Для оцінки ефективності використання азоту при виробництві молока використано модель (1) для прогнозування за Huhtanen et al. (2015), розроблену на основі залишкової дисперсії для оцінки багатofакторної мінливості MNE, яка найбільш логічно описує даний процес:

$$MNE \text{ (г/кг)} = 238 + 7,0 \times (MY \text{ кг/день}) - 0,064 \times (MY^2) - 2,7 \times (MUN \text{ мг/дл}) - 0,10 \times (W) \quad (1)$$

де MY – молочна продуктивність, кг;

MUN – рівень азоту сечовини молока, мг/дл;

W – вага корови, кг

При цьому MNE розглядається як показник ефективності використання азоту, який поступає з кормом, для виробництва молока з критерієм оцінювання: чим вище цей показник – тим ефективніше використовується азот корму.

Кількість сечовини в молоці визначали діацетилмонооксимним методом за методикою Langenfeld et al. (2021). Молярну концентрацію сечовини (С) в значенні ммоль/л визначали за отриманими даними оптичної густини досліджуваної проби А відносно стандарту В за формулою (2):

$$C = 8,33 \frac{A}{B} \quad (2)$$

ЕСМ розраховували за методикою Hall (2023) за формулою (3):

$$ЕСМ = [(\text{вміст жиру, \%} \times 383 + \text{вміст білку, \%} \times 242 + \text{вміст лактози, \%} \times 165,4 + 20,7) / 3140] \times \text{молочна продуктивність, кг} \quad (3)$$

Статистичний аналіз (описова статистика, дисперсійний аналіз, кореляційний та регресійний аналіз) проводився з використанням програми RStudio–2023.03.0–386.

Для вивчення взаємозв'язку між залежною змінною (результатом) та однією або декількома незалежними змінними (факторами) використано класичне рівняння регресії (4):

$$y = a + bx + e \quad (4)$$

де у – значення ознаки по лінії регресії;

а– вільний член моделі;

b– коефіцієнт регресії;

x– змінна величина; e– похибка

Коефіцієнт детермінації для парної лінійної регресії розраховувався як квадрат коефіцієнта кореляції (r^2).

За якісними показниками молока досліджувані тварини були об'єднані в загальну вибірку, що дало змогу розрахувати вплив таких факторів як «Рік–місяць отелення», «Бугай–плідник», «Номер лактації» (табл. 1):

Таблиця 1

Описова статистика досліджуваних ознак

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
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
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
MUN мг/дл	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
MNE г/кг	116,6	365,5	287,6±1,65	1622,6	40,3	14,0
ЕСМ кг	10,3	66,6	29,13±0,35	70,0	8,37	28,7

Примітка: Розроблено авторами на основі досліджень (Ruban & Shabash, 2025).

Результати досліджень та їх обговорення. Для більш практичного застосування наведених у табл. 1 результатів, нами проведено розрахунки регресійної залежності (b) основних компонентів молока (x) на NME (табл. 2).

Таблиця 2

Регресійна залежність (b) основних компонентів молока (x) на MNE та коефіцієнт детермінації (r²)

Впливаюча ознака (x)	Рівняння регресії де:		t	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
Вага корови	330,04894 ± 20,10700	-0,07038 ± 0,03825	1,84	0.0060
ЕСМ	202,37247 ± 2,99822	3,11574 ± 0,09893	31,49 *	0.6371

Примітка. – p≤0,05. Розроблено авторами на основі досліджень (Ruban & Shabash, 2025)

Коефіцієнт детермінації (r²) відображає частку варіації залежної змінної, яка пояснюється незалежними змінними в моделі, підтверджуючи її якість (чим ближче значення r² до 1, тим повніше модель описує вплив відповідних факторів). Таким чином, найбільш прогностично значущими ознаками щодо рівня MNE є величина добового надою (r² = 0,71), величина надою, скоригованого за вмістом енергії (r² = 0,63), а також значення MUN (r² = 0,20).

На основі вірогідних значень регресії представлені описові рівняння:

$$MNE = 201,82 + 3,29 * (\text{добовий надій}) + e;$$

$$MNE = 323,49 - 2,49 * MUN + e;$$

$$MNE = 202,37 + 3,12 * (\text{надій, скорегований на вміст енергії}) + e$$

Для візуалізації виявлених закономірностей наведено матеріали рис. 2, 3, 4.

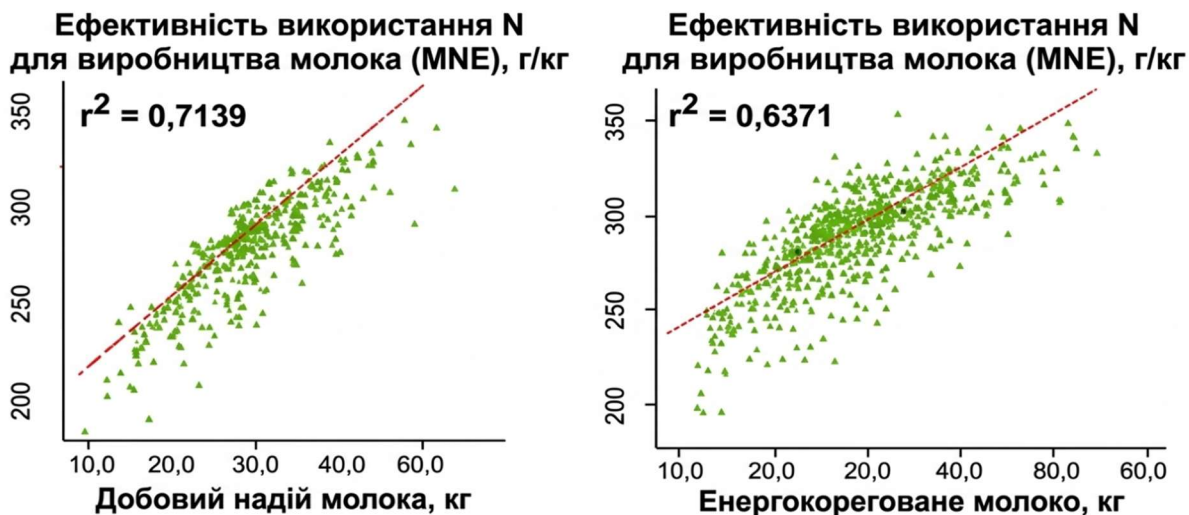


Рис. 2. Коефіцієнт детермінації (r²) та регресійна залежність добового надою (b=3,29221 ± 0,08769) та надою, скорегованого на вміст енергії (b=3,11574 ± 0,09893) з значеннями NME (n= 595)

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. За даними Bougouin et al. (2022), моделі, засновані на споживанні ДМІ 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. 3) свідчить про наявність від'ємної регресійної залежності між цими показниками та ефективністю використання азоту для виробництва молока (MNE).

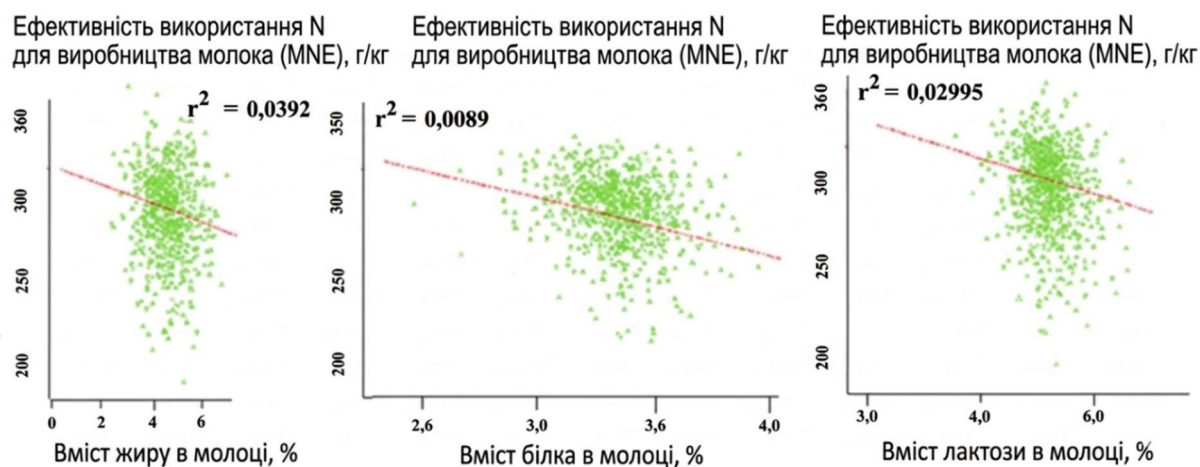


Рис. 3. Коефіцієнт детермінації (r^2) та регресійна залежність впливу вмісту жиру ($b = -5,928 \pm 1,235$), білка ($b = -42,322 \pm 7,769$) та лактози ($b = -17,454 \pm 4,209$) у молоці на значення NME ($n = 595$)

За результатами експериментів Nuhtanen et al. (2015), 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. Musembei et al. (2023) 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. (2024) 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. (2024), 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 (Fedota et al., 2020).

На рис. 4 наведено регресійну залежність основного показника — MUN від MNE.

За висновками Huhtanen et al. (2015), 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. Відповідна позначка овальної форми на рис. 4 вказує на «ефективних корів» (ЕК), які поєднують високі значення MNE з оптимальними характеристиками MUN. Підвищені значення MNE (≥ 300 г/кг) у 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.

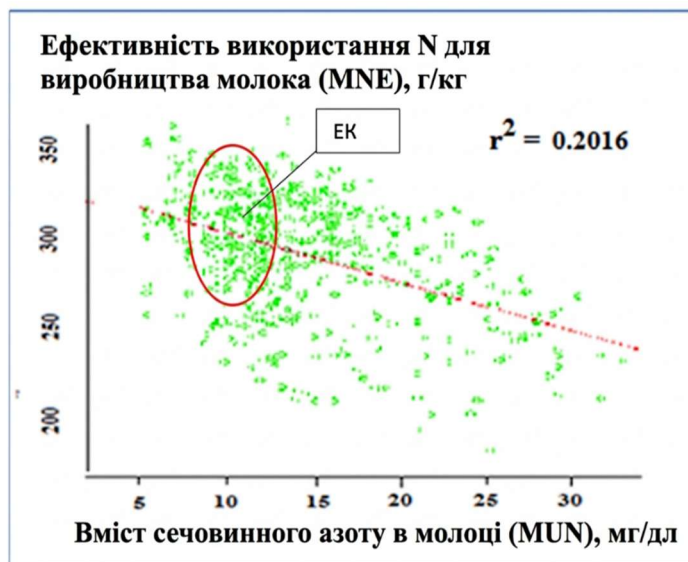


Рис. 4. Значення коефіцієнта детермінації (r^2) та регресійна залежність ($b = -2,495 \pm 0,209$) впливу вмісту MUN на значення MNE, з визначенням зони – ЕК, до якої відносяться «ефективні корови» ($n = 595$)

На основі моделювання змін величини добового надою, маси корів та рівня MUN за формулою (1) продемонстровано динаміку змін MNE, що наведено на рис. 5, 6, 7.

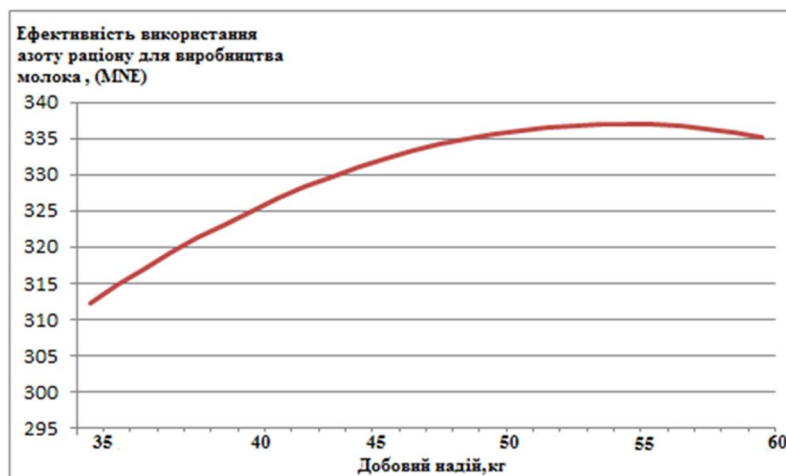


Рис. 5. Залежність MNE від добового надою

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. (2026), 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 (NH₃), нітратів (NO₃⁻) і оксидів азоту (NO₂) 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 (2009) довели, що уникнення переогодовування 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. 6, 7), 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.

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. 6, 7).



Рис. 6. Залежність MNE від MUN

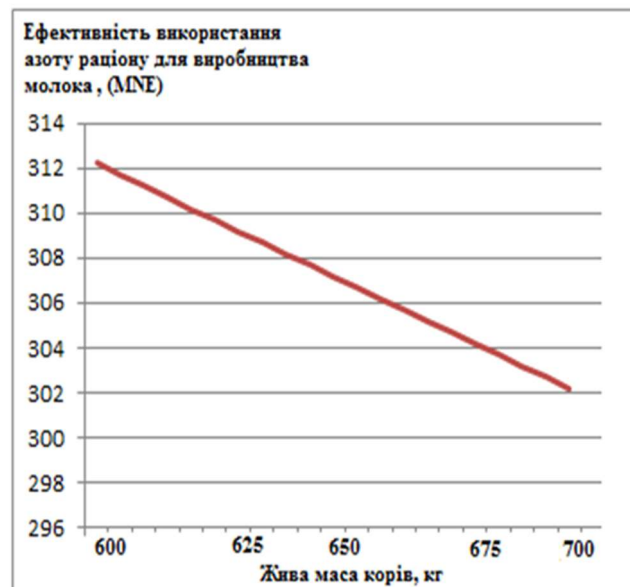


Рис. 7. Залежність MNE від живої маси корів

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 доквілля та причиною вимивання сполук азоту з навколишнього середовища. Таким чином, розглянуті ключові фактори впливу та біохімічні процеси комплексно характеризують механізми формування показника MNE у молочній худобі.

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.

Висновки.

1. Основні компоненти молока — вміст жиру, білка, рівень лактози та азот сечовини молока (MUN) — характеризуються широким діапазоном фенотипового прояву, що відображає складні біохімічні процеси в організмі жуйних тварин і багатофакторний характер їх регуляції.

2. У проведеному дослідженні не виявлено статистично значущого впливу генетичної компоненти (походження за батьком) на рівень MUN.

3. Встановлено регресійну залежність рівня MNE від таких впливових ознак: добового надою ($r^2 = 0,71$), надою, скорегованого за вмістом енергії ($r^2 = 0,63$), та рівня MUN ($r^2 = 0,20$). Найбільшу прогностичну цінність має показник добового надою.

4. Пошук генетичного впливу на коливання рівня MUN доцільно здійснювати на основі аналізу динаміки повторних вимірювань цього показника в часі в розрізі генетичних груп.

5. Подальші дослідження у цьому напрямі дозволять розширити масив аналітичних даних та, у поєднанні з методами оптимізації й математичного моделювання, сформулювати практичні рекомендації щодо використання комплексних показників оцінки ефективності азотного обміну.

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

7. Для точної оцінки впливу генетичної компоненти на показники MUN та MNE рекомендовано застосовувати модель плідника за алгоритмом найкращого лінійного незміщеного прогнозу (BLUP — *Best Linear Unbiased Prediction*), що забезпечує коректне розмежування генетичних і середовищних ефектів.

References

- Babalyan, V., Valilshchikov, M., Pavlov, S., Koshevaya, E., & Fedota, O. (2019). Study of bone tissue repair after a femur fracture depending on the correction of arterial hypertension in model object, *Rattus norvegicus* (rat gray). *Georgian Med News*, 286, 72–77. PMID: 30829593
- Badhan, A., Wang, Y., Terry, S., Gruninger, R., Guan, L. L., & McAllister, T. A. (2025). Invited review: Interplay of rumen microbiome and the cattle host in modulating feed efficiency and methane emissions. *Journal of Dairy Science*, 108(6), 5489–5501. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-26063>
- Borshch, O. O. (2023). *The impact of global climate change on individual elements of milk production technology* (Doctoral dissertation, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv). 404 p.

- Bougouin, A., Hristov, A., Dijkstra, J., et al. (2022). Prediction of nitrogen excretion from data on dairy cows fed a wide range of diets compiled in an intercontinental database: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 105(9), 7462–7481. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20885>
- De Marchi, M., Toffanin, V., Cassandro, M., & Penasa, M. (2014). Mid-infrared spectroscopy as phenotyping tool for milk traits. *Journal of Dairy Science*, 97, S1171–S1186. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6799>
- DSTU 3662:2018. Raw cow milk: Technical specifications. Kyiv: Standard, p.13.
- European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes. (1986, March). Retrieved from <https://rm.coe.int/168007a67b>
- Fedota, O. M., Roschenyuk, L. V., Tyzhnenko, T. V., Puzik, N. G., Vorontsov, V. M., & Ryzhko, P. P. (2020). Methotrexate effect on biochemical indices of psoriasis patients depends on MTHFR gene polymorphism. *Ukrainian Biochemical Journal*, 92(1), 66–74. <https://doi.org/10.15407/ubj92.01.066>
- Fedota, O., Babalyan, V., Ryndenko, V., Belyaev, S., & Belozorov, I. (2020). Lactose tolerance and risk of multifactorial diseases on the example of gastrointestinal tract and bone tissue pathologies. *Georgian Med News*, 303, 109–113. PMID: 32841191
- Fedota, O., Puzik, N., Skrypkina, I., Babalyan, V., Mitiohlo, L., Ruban, S., Belyaev, S., Borshch, O. O., & Borshch, O. V. (2022). Single nucleotide polymorphism C994G of the cytochrome P450 gene possess pleiotropic effects in *Bos taurus* L. *Acta Biologica Szegediensis*, 66(1), 7–15. <https://doi.org/10.14232/abs.2022.1.7-15>
- Gengler, N., Soyeurt, H., Dehareng, F., Bastin, C., Hammami, H., & Vanderick, S. (2016). Capitalizing on fine milk composition for breeding and management of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99, S4071–S4083. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10140>
- Hall, M. B. (2023). Invited review: Corrected milk: Reconsideration of common equations and milk energy estimates. *Journal of Dairy Science*, 106, 2230–2246. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22219>
- Hossein-Zadeh, N. G. (2024). Milk urea nitrogen is genetically associated with production and reproduction performance of dairy cows: A meta-analysis. *Livestock Science*, 283, 105461. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105461>
- Hristov, P., Huhtanen, G., van Duinkerken, D., & Pacheco. (2026). Invited review: Perspectives on nitrogen in dairy cattle nutrition. *Journal of Dairy Science*, 109(3), 2074–2107. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-27276>
- Huhtanen, P., & Hristov, A. N. (2009). A meta-analysis of the effects of dietary protein concentration and degradability on milk protein yield and milk N efficiency in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 92, 3222–3232. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1352>
- Huhtanen, P., Cabezas-Garcia, E. H., Krizsan, S. J., & Shingfield, K. J. (2015). 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*, 98(5), 3182–3196. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8215>
- Kondratiuk, V. M., Ruban, S. Y., Borshch, O. O., Tsentylo, L. V., Vdovenko, N. M., Hruntkovsky, M. S., Rosomakha, Y. O., & Zhuravel, M. P. (2024). *Modernization of dairy farms (engineering, feeding, genomic prediction)*. Kyiv: PE O.V. Yamchynskyi
- Langenfeld, N., Laurenpayne, & Bugbee, B. (2021). Colorimetric determination of urea, V.4. Utah State University; Crop Physiology Laboratory. <https://dx.doi.org/10.17504/protocols.io.14egnzmzqg5d/v4>
- Law of Ukraine No. 3447-IV «On the Protection of Animals from Cruelty» (2006, February). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15#Text>
- Musembi, L., Bett, R., Gachuri, Ch., & Kibegwa, F. (2023). Potential role of rumen bacteria in modulating milk production and composition of admixed dairy cows. *Letters in Applied Microbiology*, 76, 1–9. <https://doi.org/10.1093/lambio/ovad007>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2001). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/806>
- Perneel, M., De Smet, S., & Verwaeren, J. (2024). Data-driven prediction of dairy cattle lifetime production and its use as a guideline to select surplus youngstock. *Journal of Dairy Science*, 107, 9390–9403. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23660>
- Ruban, S. Y., & Vasilevsky, M. V. (2015). Organization of normalized feeding in dairy cattle breeding. Kyiv: Luxar

- Ruban, S., & Shabash, M. (2025). Assessment of the efficiency of feed protein use in dairy cattle based on the indicators of fat, protein, lactose and urea nitrogen in milk. *Scientific and Technical Bulletin of Livestock Farming Institute of NAAS*, 135, 132–144.
- Ruban, S., Shabash, M., Tupitska, O., & Slobodyanyuk, N. (2025). Effect of breed factor on urea level and blood biochemical parameters in dairy cattle. *Animal Science and Food Technology*, 16(1), 9–25. <https://doi.org/10.31548/animal.1.2025.09>
- Salamone, M., Adriaens, I., Vervae, A., Opsomer, G., Atashi, H., Fievez, V., Aernouts, B., & Hostens, M. (2022). Prediction of first test day milk yield using historical records in dairy cows. *Animal*, 16, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100658>
- Saleh, A. A., Easa, A. A., Hedainy, D. K. EL, & Rashad, A. M. A. (2023). Prediction of some milk production traits using udder and teat measurements with a spotlight on their genetic background in Friesian cows. *Scientific Reports*, 13, 16193. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43398-y>
- Silva Neto, J. B., Mota, L. F. M., Londoño-Gil, M., Schmidt, P. I., Rodrigues, G. R. D., Ligor, V. A., Arikawa, L. M., Magnabosco, C. U., Brito, L. F., & Baldi, F. (2024). *Genotype-by-environment interactions in beef and dairy cattle populations: A review of methodologies and perspectives on research and applications*. *Animal Genetics*, 55(6), 871–892. <https://doi.org/10.1111/age.13483>
- Souza, R. A., Tempelman, R. J., Allen, M. S., Weiss, W. P., Bernard, J. K., & VandeHaar, M. J. (2018). Predicting nutrient digestibility in high-producing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 101, 1123–1135. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13344>
- Souza, V. C., Aguilar, M., Amburgh, M. V., Nayananjalie, W. A. D., & Hanigan, M. D. (2021). Milk urea nitrogen variation explained by differences in urea transport into the gastrointestinal tract in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104, 6715–6726. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19787>
- Spek, J. W., Bannink, A., Gort, G., Hendriks, W. H., & Dijkstra, J. (2013). Interaction between dietary content of protein and sodium chloride on milk urea concentration, urinary urea excretion, renal recycling of urea, and urea transfer to the gastrointestinal tract in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 96, 5734–5745. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6842>
- Wattiaux, M. A., Aguerre, M. J., & Powell, J. M. (2011). Background and overview on the contribution of dairy nutrition to addressing environmental concerns in Wisconsin: Nitrogen, phosphorus, and methane. In C. F. M. Alvarez (Ed.), *La Ganadería Ante el Agotamiento de los Paradigmas Dominantes* (Vol. 1, pp. 111–139). Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.researchgate.net/publication/283994259>
- Xiaowei Zhao, C. Z., S. Zhao, N. Zheng, Y. Zhang, & J. Wang. (2024). The role of milk urea nitrogen in nutritional assessment and its relationship with phenotype of dairy cows: A review. *Animal Nutrition*, 20, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2024.08.007>
- Xiaowei Zhao, C., Zang, C., Zhao, S., Zheng, N., Zhang, Y., & Wang, J. (2025). Assessing milk urea nitrogen as an indicator of protein nutrition and nitrogen utilization efficiency: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 108(5), 4851–4861. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25656>