https://doi.org/10.15407/animbiol27.03.068
UDC 577.113.3:636.2
Received 25.08.2025 ▪ Revision 17.09.2025 ▪ Accepted 24.09.2025 ▪ Published online 22.10.2025

Моделювання впливу змін продуктивних показників у молочних корів на ефективність використання азоту корму

С. Ю. Рубан, М. Л. Шабаш
rubansy@gmail.com

Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

ORCID:
S. Y. Ruban https://orcid.org/0000-0002-8114-3665
M. L. Shabash https://orcid.org/0009-0000-8452-2823

Authors' Contributions:
RSY: Supervision; Project administration; Methodology; Conceptualization; Formal analysis; Writing — original draft.
UGO: Data curation; Investigation; Writing — original draft, review & editing.

Declaration of Conflict of Interests:
None to declare.

Ethical approval:
Not applicable.

Acknowledgements:
The authors would like to thank the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine for financial support, as well as Olga Tupitska for conducting biochemical studies and Viktor Danshin for statistical processing of the results.

Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Наведено узагальнений аналіз основних підходів щодо опису й розуміння особливостей регулювання розщеплення та ферментації поживних речовин корму в корів на прикладі моделі Моллі. Матеріалом для досліджень слугували дані 595 корів голштинської породи, які утримуються в умовах ТОВ «Агрофірма "Колос"» Київської області. Проведено аналіз зв'язку між такими вихідними параметрами, як: величина надою, вміст жиру, білку, лактози, рівень сечовини в молоці (MUN), жива маса корів і рівень надою, скоригований на енергетичну цінність (ECM). Як основний біомаркер використано значення MUN. Проведено розрахунки ефективності використання азоту для виробництва молока (MNE, англ. *milk nitrogen is effective*) залежно від показників продуктивності. На основі регресійного аналізу отримано такі вірогідні залежності: MNE — добовий надій +3,29; MNE — вміст жиру в молоці -5,93; MNE — вміст білку в молоці -42,32; MNE — вміст лактози в молоці -17,45; MNE — MUN -2,49; MNE — жива маса корови -0,07; MNE — надій, скоригований на вміст енергії +3,12. На основі отриманих коефіцієнтів регресії змодельовано можливі зміни ефективності використання азоту, коли внаслідок збільшення абсолютного значення таких показників, як: вміст жиру, білку й лактози в молоці, MUN, живої маси корів, MNE зменшується, а внаслідок зростання добового надою та надою, скоригованого на енергетичний вміст, спостерігається збільшення MNE раціону для виробництва молока. Отримані дані свідчать про можливість використання індивідуальних або групових значень вмісту MUN і MNE на виробництві молока в програмах оцінки й відбору для надійного прогнозування отриманого ефекту за молочною продуктивністю, складом молока та ефективністю виробництва.

Ключові слова: азот сечовини молока (MUN), ефективність використання азоту для виробництва молока (MNE), білок, жир, лактоза

Вступ

Використовуючи інформацію про виробництво кормів та потреби в них у тварин в Сполучених Штатах Америки, A. Ostroski, O. A. Prokopyev, V. Khanna розробили аналітичну мережу просторових потоків азоту, пов'язаних з ланцюгами виробництва яловичини [16]. Автори запропонували алгоритм для підвищення ефективності кормів, шляхом переробки гною як джерела азоту для кормових культур та отримання відносно дешевої продукції тваринництва. M. Quemada, L. Lassaletta обґрунтували спосіб збільшення ефективності використання азоту NUE (nitrogen use efficiency) в системі вирощування сільськогосподарських культур (рослина—ґрунт), констатуючи суттєву залежність рослинництва від азотних добрив

з 47 % до 95 % [17]. Загалом за останні десятиліття залежність глобальних систем вирощування сільськогосподарських культур від азотних добрив зросла до 83 %, а NUE стає новим показником для оцінки агроекологічної стійкості систем вирощування сільськогосподарських культур. За таких обставин виникає необхідність пошуку відповідних методик для оцінювання тих тварин, які ефективно використовують азот корму [1, 7, 18].

Корми для молочних корів містять азот у формі справжнього білку та небілкового азоту NPN (від англ. non-protein nitrogen). NPN включає такі сполуки: сечовина (англ. urea або карбамід — кінцевий продукт обміну білків в організмі), біурет (англ. Biuret — аміди алофанової кислоти), солі амонію (англ. ammonium salts). NPN може бути перетворено на білок мікробами рубця, що робить їх додатковим джерелом справжнього білку [19]. Справжній білок включає азот, що міститься в амінокислотах, відрізняється швидкістю та повнотою його розщеплення в рубці й залежить від виду корму та його якісних показників [2, 7, 20, 26]. NPN може бути економічно ефективним способом доповнення білку в раціонах молочних корів, особливо якщо вміст справжнього білку низький. Таким чином, сирий протеїн CP (від англ. Crude protein) у кормі для корів є мірою загального вмісту протеїну та включає: справжній білок, який складається з амінокислот; білки, що розщеплюються в рубці RDP (англ. rumen degradable protein for specified feed) — тип справжнього білку, який розщеплюється і перетворюється на вільні амінокислоти, пептиди й аміак, мікроорганізми рубця використовують їх для росту та створення мікробного білку — основного джерела білку для жуйних тварин; не розщеплюваний білок рубця RUP (від англ. rumen undegradable protein), відомий як обхідний білок, або тип справжнього білку, який проходить через рубець у незмінному вигляді [10, 13, 24]. Частина його всмоктується в тонкому кишківнику для забезпечення потреб в амінокислотах, а решта виводиться; небілковий азот (NPN) не є білком, але вміст азоту допомагає мікробам рубця виробляти мікробний білок. У таблиці 1 представлено структуру груп за вмістом CP.

Таблиця 1. Групи сирого протеїну для великої рогатої худоби
Table 1. Crude protein groups for cattle

Сирий протеїн CP (Crude protein)		
Небілковий азот NPN (Nonprotein Nitrogens)	Справжній протеїн, або натуральний протеїн TP (True Protein, Natural Protein)	
	Розщеплюваний протеїн RDP (Degradable Protein)	Нерозщеплюваний протеїн RUP (Undegradable Protein)
Споживання розщеплюваного протеїну DIP (Degradable Intake Protein)		Споживання нерозщеплюваного протеїну UIP (Undegradable Intake Protein)

Джерело / Source. https://www.starblends.com/news/crude-protein

Щоб розрахувати сирий протеїн у кормі, вміст азоту множать на 6,25, базуючись на тому, що білки зазвичай містять 16 % азоту (1/0,16 = 6,25), а зворотній розрахунок дає можливість визначити кількість азоту в кормі (1/6,25 = 0,16). Однак найточнішим способом визначення кількості азоту залишається лабораторний аналіз, який може надати точну інформацію про вміст сирого протеїну в кожному з видів корму. P. Huhtanen та ін. запропонували використовувати концентрацію азоту сечовини молока (NMCE), рівень якої залежить від концентрації та кількості сирого протеїну в раціоні [8]. Для цього NMCE використовується як біомаркер ефективності використання N для виробництва молока лактуючими коровами — MNE (англ. milk nitrogen efficiency). MNE розглядають як показник ефективності використання азоту, що надходить з кормом для утворення молока. За даними V. Souza, M. Wattiaux, азот сечовини молока (MUN) та азот сечовини крові (BUN) корелюють з балансом і виділенням азоту; однак є також генетична компонента концентрацій MUN, яка може бути пов'язана з відмінностями у транспорті сечовини [21, 25]. Було висунуто гіпотезу, що частина варіацій концентрацій MUN у корів спричинена відмінностями у шлунково-кишковому та нирковому кліренсі сечовини. В роботі S. Ruban та ін. доведено суттєвий вплив фактору породи за такими біохімічними показниками крові, як рівень загального білірубіну 24,70 %, сечовини 33,20 %, креатиніну 49,80 %, аланінамінотрансферази 10,40 %, аспартатамінотрансферази 46,30 %, альбуміну 35,10 % та загального білку 13,20 % [18]. Дослід проведено в однакових умовах утримання й годівлі, але на достатньо контрастних породах: 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 фенотипічної дисперсії.

Аналіз і попередні аналітичні звіти Xiaowei Zhao та ін. показують, що концентрація CP в раціоні є не єдиним фактором живлення, який впливає на концентрацію MUN [26]. Рівень у раціоні неструктурних вуглеводів NFC (англ. non fiber carbohydrate), до яких входять цукри, крохмаль і пектин, також відіграє важливу роль. Автори наводять лінійний регресійний аналіз для 91 набору експериментальних даних за співвідношенням NFC/CP у «вхідному» раціоні до концентрації MUN мг/дл, яка становить +0,68. Констатовано 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 азоту із сечею. N. Hossein-Zadeh провів метааналіз з використанням моделі випадкових ефектів для інтеграції оцінок успадковуваності для MU і MUN, які були низькими та становили 0,20 та 0,18 відповідно [6]. Оцінка генетичних кореляцій між MUN та продуктивними ознаками були низькими й коливалися від -0,04 між MU та відсотком лактози в молоці, до 0,10 між MUN та виходом молочного білку, а також -0,07

між MUN і балом соматичних клітин та 0,36 між MUN і виходом молочного білку.

Метою нашої роботи було визначити взаємозв'язок і регресійну залежність між основними компонентами молока (вміст жиру, білку, лактози), величиною надою, живою масою корів, MUN та MNE. Основним інтегруючий біомаркером і предиктором складних біохімічних процесів виступило значення MNE, а на основі отриманих регресійних залежностей проведено прогнозування значення MNE відносно змін ознак основних компонент молока, величини надою та живої маси корів.

Матеріали і методи

Матеріалом для досліджень слугували дані експерименту на коровах голштинської породи в умовах Товариства з обмеженою відповідальністю «Агрофірма "Колос"» Київської області. Під час проведення експериментальних досліджень всі маніпуляції з коровами (595 голів) виконували з урахуванням основних принципів біоетики, відповідно до Статті 26 Закону України № 3447 «Про захист тварин від жорстокого поводження» (2006) [15], Європейської конвенції про захист хребетних тварин, які використовуються для експериментальних та інших наукових цілей (1986) [4] і Порядку проведення науковими установами дослідів, експериментів на тваринах (2012) [14]. У господарстві використовують прив'язну систему утримання з доїнням в молокопровід. Доїння триразове, один дояр обслуговує до 50 корів. Годівлю проводять з використанням загального змішаного раціону (TMR), характеристику якого подано в таблицях 2, 3.

Співвідношення NFC/CP важливе, оскільки воно впливає на утворення молока, особливо молочного білку, і може зумовлювати ризики зі здоров'ям та відтворенням корів. Збалансоване співвідношення NFC/CP коливається від 2,15 до 3,60, що зазвичай бажане для підтримки оптимального рівня MUN [23]. Згідно із загальноприйнятими нормами, рівень NFC у TMR визначено шляхом віднімання рівня цих компонентів у відсотках за сухою речовиною у TMR від 100 %. Водночас NFC включає крохмаль, цукор і пектин, а визначення їхнього вмісту базувалося на розрахунку решти відсотків після врахування рівня клітковини, білку, жиру й золи.

Для оцінки ефективності використання азоту під час виробництва молока використано модель (1) для прогнозування за P. Huhtanen та ін. [8], розроблену на основі залишкової дисперсії для прогнозування багатофакторної нестабільності (MNE) виробничих даних, яка найбільш логічно описує цей процес:

$$\text{MNE (г/кг)} = 238 + 7{,}0\ (\text{MY кг/день}) - 0{,}064 \times (\text{MY2}) - 2{,}7 \times (\text{MUN мг/дл}) - 0{,}10 \times (\text{W}) \quad (1),$$

де MY — молочна продуктивність, кг;
MUN — рівень азоту сечовини молока, мг/дл;
W — маса корови, кг.

При цьому MNE розглядається як показник ефективності використання азоту, який надходить з кормом, для утворення молока.

Кількість сечовини в молоці визначали діацетилмонооксимним методом. Про її рівень судили за вмістом червоного комплексу, утвореного сечовиною з діацетилмонооксимом у кислому середовищі за наявності тіосемікарбозіда й тривалентного заліза за методикою N. Langenfeld та ін. [11]. Молярну концентрацію сечовини (C) в значені ммоль/л визначали за отриманими даними оптичної густини досліджуваної проби A відносно стандарту B за формулою (2):

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

Надій, скоригований на енергію (ECM), розраховували згідно з M. Hall [5] за формулою:

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

Статистичний аналіз (описова статистика, дисперсійний аналіз, кореляційний і регресійний аналіз) проведено з використанням програми *RStudio-2023.03.0-386*.

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

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

де a — вільний член моделі;
b — коефіцієнт регресії;
x — змінна величина;
e — похибка.

Аналіз якісних та біохімічних показників молока визначали на ультразвуковому аналізаторі «EKOMILK Bond».

Результати

Для коректного опису особливостей травлення азоту, поглинання, засвоєння і метаболізму, обміну речовин, рівня сечовини, а також ефективності утилізації азоту з кінцевим аналізом молока [12], використано модель корови Моллі (рис. 1).

За P. Gregorini та ін. ця модель належить до класу детермінованої, механістичної, динамічної моделі, що враховує травлення, метаболізм і утворення продукції дійною коровою на основі математичних рівнянь [4]. Автори зіставили прогнози ентерального (в умовах проходження кормового субстрату через весь шлунково-кишковий тракт) продукування метану з вихідною математичною версією Моллі (Molly Origin) і

Таблиця 2. Характеристика суміші TMR для корів голштинської породи
Table 2. Characteristics of TMR mixture for Holstein cows

Інгредієнти раціону Diet ingredients	Вага, кг / Weight, kg		Відсоток / Percentage	
	фізична physical	за сухою речовиною by dry matter	за фізичною вагою by physical weight	за сухою речовиною by dry matter
Силос кукурудзяний / Corn silage	28,00	9,24	49,36	37,55
Зернова суміш / Grain mix	8,72	7,97	15,38	32,37
Пивна дробина (волога) Brewer's grain (wet)	5,00	0,92	8,81	3,76
Сінаж люцерни / Alfalfa silage	3,50	1,84	6,17	7,47
Жом / Beet pulp	4,00	0,56	7,05	2,28
Зерно кукурудзи підвищеної вологості Corn grain (wet)	2,20	1,54	3,88	6,26
Шрот соняшниковий / Sunflower meal	1,50	1,38	2,64	5,63
Солома / Straw	0,80	0,70	1,41	2,86
Вода / Water	2,00	0,00	3,53	—
Меляса бурякова / Beet molasses	1,00	0,45	1,76	1,83
Всього / Total	56,72	24,60	100,00	43,40

Примітка. Розраховували для корів, вагою 550–650 кг, з надоєм 28–30 кг, вмістом у молоці жиру 4,00 %, вмістом у молоці білка 3,40 % рівнем лактози 4,68 %.
Джерело. За результатами хімічного аналізу компанії ABM від 25.04.2025.

Note. calculated for cows weighing 550-650 kg, milk yield 28-30 kg, fat content 4.00 %, protein content 3.40 %, lactose level 4.68 %.
Source. Based on the results of chemical analysis by ABM on 25 April 2025.

Таблиця 3. Біохімічна характеристика TMR дійних корів
Table 3. Biochemical characteristics of TMR in dairy cows

Компоненти Components	Вміст за сухою речовиною, % Dry matter,%	Вміст, г Content, g
Сирий протеїн / Crude protein	15,84	3 897,69
Нейтрально-детергентна клітковина / Neutral detergent fiber	28,95	7 124,15
Нейтрально-детергентна клітковина фуражу Neutral detergent fiber in forage	20,44	5 030,74
Кислотно-детергентна клітковина / Acid detergent fiber	19,41	4 777,21
Цукор / Sugar	6,15	1 513,01
Крохмаль / Starch	26,07	6 416,21
Розчинна клітковина / Soluble fiber	7,93	1 951,36
Зола / Ash	7,64	1 879,01
Кальцій / Calcium	0,65	160,46
Фосфор / Phosphorus	0,40	98,13
Магній / Magnesium	0,44	107,55
Калій / Potassium	1,11	272,68
Фураж / Forage	47,87	—
Концентрат / Concentrates	52,13	—
Загальні вуглеводи / Total carbohydrates	73,15	18 002,88
Аміак / Ammonia	0,48	119,06
Неструктурні вуглеводи / сирий протеїн Non-fiber carbohydrates / crude protein	2,03	—

Примітка. За результатами хімічного аналізу компанії ABM від 25.04.2025.
Note. Based on the results of chemical analysis by ABM dated 25 April 2025.

Таблиця 4. Описова статистика досліджуваних ознак (n=595)
Table 4. Descriptive statistics of the studied characteristics (n=595)

Ознака / Characteristic	Min	Max	M±m	σ^2	σ	Cv, %
Добовий надій, кг / Daily milk yield, kg	10,00	56,00	27,7±0,36	70,20	8,40	30,30
Вміст жиру / Fat content, %	3,17	5,73	4,39±0,08	0,68	0,82	16,70
Вміст білку / Protein content, %	2,40	4,00	3,40±0,01	0,03	0,17	5,00
Вміст лактози / Lactose content, %	0,50	5,80	4,68±0,01	0,10	0,32	6,80
pH	2,10	7,40	7,09±0,01	0,06	0,24	3,40
MUN, мг/дл	2,60	32,90	12,31±0,24	35,60	5,97	48,50
Жива маса корів, кг / Live weight of cows, kg	488,00	650,00	526,40±0,75	308,00	17,50	3,30
MNE* раціону для виробництва молока MNE* of diet for milk production	116,60	365,50	287,60±1,65	1622,60	40,30	14,00
Надій, скоригований на енергетичний вміст (ECM) Milk yield adjusted for energy content (ECM)	10,30	66,60	29,13±0.35	70,00	8,37	28,70

Примітка. * MNE — ефективність використання азоту для виробництва молока визначається як співвідношення споживання азоту до азоту в молоці.
Джерело. Розроблено авторами на основі досліджень.
Notes. * MNE nitrogen efficiency for milk production is defined as the ratio of nitrogen consumption to nitrogen in milk.
Source. Developed by the authors based on research.

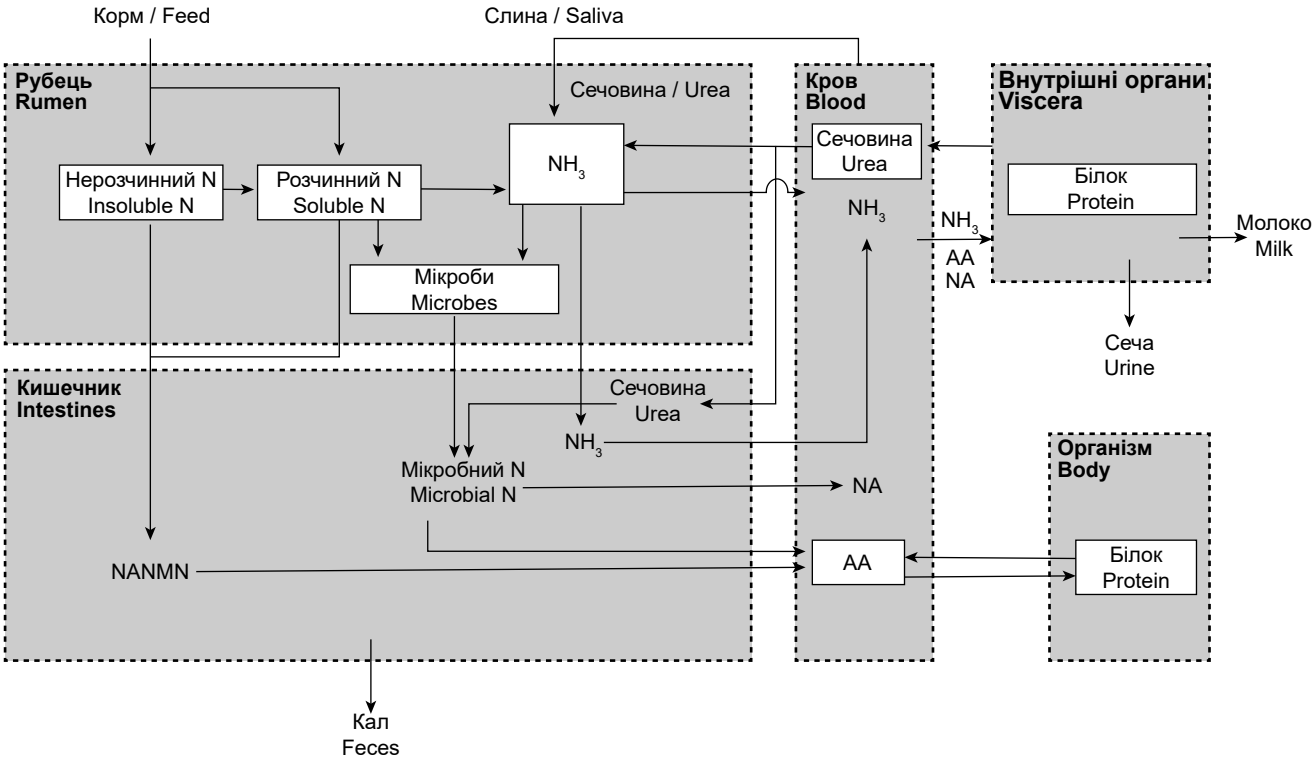

Рис. 1. Концептуальна схема метаболізму азоту в жуйних — модель Моллі
Примітка. NANMN (nonammonia, nonmicrobial nitrogen) — неаміачний, немікробний азот; NA (nucleic acids) — нуклеїнові кислоти; AA (amino acids) — амінокислоти; N — азот; NH_3 — нітрит водню (аміак); Feed — корми; Rumen — рубець; Intestines — кишківник; Saliva — слина; Blood — кров; Viscera — внутрішні органи; Body — тіло; Feces — фекалії.
Затемнені зони — це органи і тканини, де відбуваються біохімічні процеси, а стрілками позначено напрямки руху цих процесів.
Джерело. Meng M. та ін. (2019).

Fig. 1. Conceptual diagram of nitrogen metabolism in ruminants – the 'Molly model'
Note. NANMN — nonammonia, nonmicrobial nitrogen; NA — nucleic acids; AA — amino acids; N — nitrogen; NH3 — hydrogen nitrite (ammonia); Feed — feed; Rumen — rumen; Intestines — intestines; Saliva — saliva; Blood — blood; Viscera — internal organs; Body — body; Faeces — faeces. The shaded areas represent organs and tissues where biochemical processes occur, and the arrows indicate the direction of these processes.
Source. Meng M. et al. (2019).

двома оновленими на основі низки біохімічних і генетичних показників, що відповідає схемі цього експерименту. Ці версії включали вплив кількості клітковини у вмісті рубця, параметри травлення та гормональні параметри (Molly84) з переглянутою версією травних і румінальних параметрів (Molly85).

Пізніше Meng M. Li, Mark D. Hanigan [12] підвищили точність прогнозованих концентрацій летких жирних кислот (precision of predicted volatile fatty acids) завдяки вдосконаленому відображенню регуляції pH та швидкості виробництва ЛЖК. PH рубця є критичним фактором для регулювання розщеплення й ферментації поживних речовин. У попередній моделі корови Моллі це не було відображено достатньо. Проведені дослідження полягали в удосконаленні відображення pH та переналаштуванні параметрів, пов'язаних із метаболізмом рубця та перетравленням поживних речовин. Вдосконалена модель може використовуватися для оцінювання потоків азоту й енергії з різним вмістом білку, який розщеплюється рубцем — RDP (rumen-degradable protein) у величинах 40 % проти 60 %, а також крохмалю, який розщеплюється рубцем — RDSt (ruminally degraded starch) відповідно 50 % проти 75 %.

Ми розглянули зв'язок MNE для виробництва молока залежно від значень добового надою, вмісту MUN і живої маси корів (рисунки 2, 3, 4).

Зі збільшенням добового надою ефективність використання азоту для виробництва молока (MNE) зростає. Досягнувши рівня надою 53 кг, MNE знижується. Це обумовлено тим, що формула розрахунку ефективності використання азоту для виробництва молока (формула 1) містить квадрат добового надою з від'ємним коефіцієнтом (-0,06). Це пояснюється високою концентрацією всіх компонентів CP в одному кілограмі сухої речовини корму для забезпечення потреб організму. Це призводить до більших втрат азоту з екскретами й молоком.

Аналогічна залежність виникає між MNE для виробництва молока та вмістом MUN, а також живою масою корів (рисунки 2, 3).

Збільшення цих показників веде до монотонного зниження ефективності використання азоту для виробництва молока (MNE), оскільки вони входять до формули розрахунку ефективності використання азоту для виробництва молока (формула 1) з від'ємними коефіцієнтами (-2,70 та -0,10 відповідно).

За різними даними оптимальне значення MUN коливається від 10 мг/дл до 14 мг/дл, але для багатьох країн рекомендовані значення азоту сечовини молока для коров'ячого молока коливаються від 10 мг/дл до 16 мг/дл молока [18, 22]. Зміни NME відносно значень живої маси корів (рисунок 4), свідчать про необхідність більших витрат як білкових, так і енергетичних компонент корму, — обмін, прямо пропорційно пов'язаний з більшою живою масою корів.

Своєю чергою така залежність сприяє зменшенню непродуктивного використання корму на синтез молочної продукції.

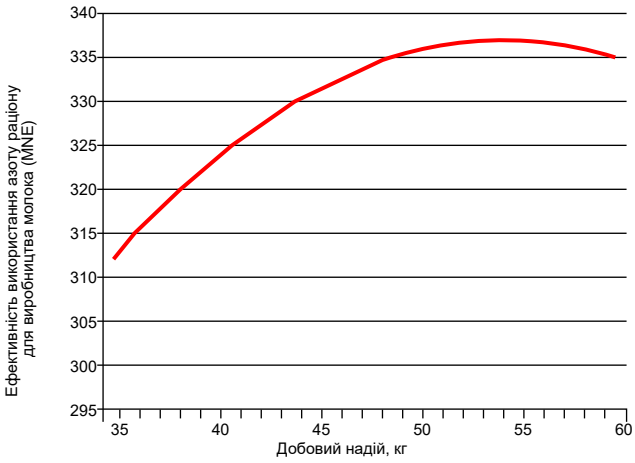

Рис. 2. Залежність MNE раціону від добового надою
Джерело. Розроблено авторами на основі досліджень.
Fig. 2. Dependence of MNE ration on daily milk yield.
Source. Developed by the authors based on research.

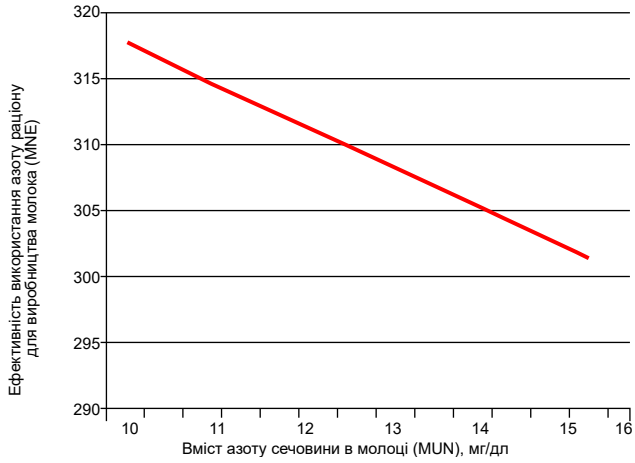

Рис. 3. Залежність MNE від MUN
Джерело. Розроблено авторами на основі досліджень.
Fig. 3. Dependence of MNE on MUN.
Source. Developed by the authors based on research.

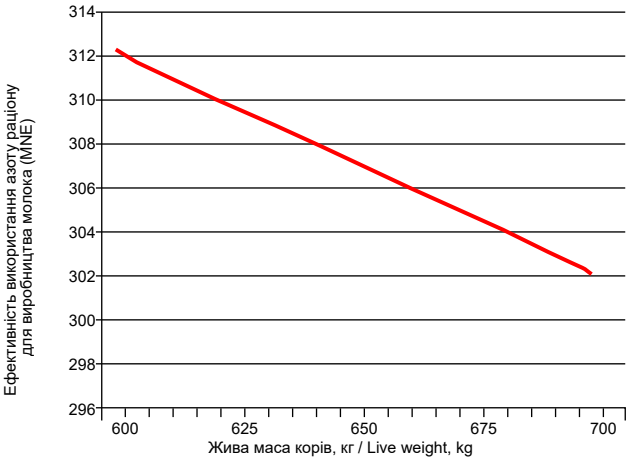

Рис. 4. Залежність MNE раціону від живої маси корів
Джерело. Розроблено авторами на основі досліджень.
Fig. 4. Dependence of MNE ration on live weight of cows.
Source. Developed by the authors based on research.

У таблиці 5 наведено розрахунки регресійної залежності (b) основних компонентів молока (x) на NME.

На основі вірогідних рівнянь регресії отримано наступні 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 білку 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, скоригований на вміст енергії) + e.

За аналітичними даними X. Zhao та ін. [27] можна констатувати: будь-які фактори, що викликають зміни MUN, можуть впливати на компоненти молока; збільшення споживання CP, що супроводжується підвищенням концентрації MUN, не впливає на вихід молочного білку, тоді як низький вміст CP може зменшити екскрецію сечовини на фенотиповому рівні, не впливаючи негативно на вміст молочного білку; 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; можлива сильна позитивна генетична кореляція (+0,85) між MUN і кількістю соматичних клітин, оскільки виникнення маститу може впливати на концентрацію MUN у молоці, а середня генетична кореляція між MUN та лактозою залежна від цього; на кореляцію між MUN і складом молока впливає стадія лактації та стан здоров'я, завдяки чому зв'язок між MUN і ознаками компонентів молока є слабким або навіть незначним.

Потенціал відбору корів з низьким фенотипом MUN для зменшення виділення азоту не впливає негативно на продуктивність і якість молока. За умови зниження ознак MUN шляхом селекційного відбору необхідно оцінити їхню кореляцію з іншими ознаками [27].

За висновками P. Huhtanen та ін., концентрація MUN не є корисним інструментом фенотипування для поліпшення MNE, але вимірювання концентрації MUN на рівні стада дозволяють точно налаштувати раціон для підвищення перетравлюваності або MNE [8]. За даними V. Ishler, найбільш рекомендовані діапазони MUN коливаються від 8 мг/дл до 12 мг/дл, що відображає раціони з балансом білку 16 %, та наявність білкових фракцій і вуглеводів для уловлювання надлишком аміаку в рубці [9]. У таблиці 6 наведено результати моделювання змін MNE раціону для виробництва молока при зміні значень добового надою, показників молока, живої маси корів і надою, скоригованого на енергетичний вміст відповідно до рівнянь лінійної регресії, наведених у таблиці 5.

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

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

Аналізуючи експериментальні дані P. Huhtanen та ін. [8], V. Ishler [9], а також отримані в цій роботі результати (рисунки 2, 3, 4) 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 і MNE.

Таблиця 5. Регресійна залежність (b) основних компонентів молока (x) від MNE для виробництва молока, кількість спостережень — 595 голів.
Table 5. Regression dependence (b) of the main components of milk (x) on MNE for milk production, number of observations — 595 heads.

Ознака (x) Characteristic (x)	Рівняння регресії, де: Regression equation where:		*t*
	вільний член (a) free term (a)	коефіцієнт регресії (b) regression coefficient (b)	
Добовий надій / Daily milk yield	201,82 ± 2,54	3,29 ± 0,09	37,55 ***
Вміст жиру в молоці / Fat content in milk	319,80 ± 5,71	-5,93 ± 1,24	2,02 ***
Вміст білку в молоці / Protein content in milk	437,16 ± 26,47	-42,32± 7,77	7,63 ***
Вміст лактози в молоці / Lactose content in milk	374,90 ± 19,76	-17,45 ± 4,21	3,88 ***
MUN	323,49 ± 2,82	-2,50 ± 0,21	11,94 ***
Жива маса корови / Live weight of cow	330,05 ± 20,11	-0,07 ± 0,04	1,84
Надій, скоригований з огляду на вміст енергії Milk yield adjusted for energy content	202,37 ± 3,00	3,12 ± 0,10	31,49 ***

Примітка. *** — P>0,999.
Джерело. розроблено авторами на основі досліджень.
Note. *** — P>0.999.
Source. developed by the authors based on research.

Таблиця 6. Моделювання змін MNE раціону для виробництва молока
Table 6. Modelling changes in the MNE ration for milk production

Контрольний показник Control indicator	Зміна добового надою, кг / Change in daily milk yield, kg						
	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 / Change in milk fat content, %							
	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 білку в молоці / Change in milk protein content, %							
	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 / Change in lactose content in milk, %							
	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 / Change in milk urea nitrogen (MUN) content, mg/dl							
	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 / Change in live weight of cows, kg							
	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, скоригованого на енергетичний вміст, кг / Change in milk yield, adjusted for energy content, kg							
	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 і надою, скоригованого на енергетичний вміст.
Джерело. Розроблено авторами на основі досліджень.
Note. Changes in daily milk yield, milk indicators, live weight of cows and milk yield adjusted for energy content are taken into account.
Source. Developed by the authors based on research.

Такі компоненти молока, як вміст жиру, білку, рівень лактози та MUN, мають широкий діапазон свого фенотипового прояву, що характеризує складні біохімічні процеси в організмі жуйних, із багатьма чинниками впливу на варіабельність цих ознак. Попередні припущення вказують на необхідність встановлення зв'язку між MUN як індикаторної ознаки щодо виділення залишкового азоту та цільовою ознакою, що визначається як індивідуальна характеристика кожної корови. Сам принцип пошуку генетичного впливу на такі коливання треба будувати на основі аналізу динаміки повторів оцінок MUN в часі у розрізі генетичних груп. Продовження досліджень в цьому напрямку дасть змогу розширити набір аналітичних даних, а в поєднанні з методами оптимізації та моделювання — дати конкретні рекомендації щодо використання таких комплексних оцінок. Пропонується використовувати індивідуальні або групові значення вмісту азоту сечовини в молоці та ефективність використання азоту на утворення молока в програмах оцінки й відбору для надійного прогнозування отриманого ефекту за молочною продуктивністю, складом молока та ефективністю виробництва.

Джерела

1. Badhan A, Wang Y, Terry S, Gruninger R, Guan LL, McAllister TA. Invited review: Interplay of rumen microbiome and the cattle host in modulating feed efficiency and methane emissions. *J Dairy Sci*. 2025; 108 (6): 5489–5501. DOI: 10.3168/jds.2024-26063.
2. Bougouin A, Hristov A, Dijkstra J, Aguerre MJ, Ahvenjärvi S, Arndt C., Bannink A, Bayat AR, Benchaar C, Boland T, Brown WE, Crompton LA, Dehareng F, Dufrasne I, Eugène M, Froidmont E, van Gastelen S, Garnsworthy PC, Halmemies-Beauchet-Filleau A, Herremans S, Huhtanen P, Johansen M, Kidane A, Kreuzer M, Kuhla B, Lessire F, Lund P, Minnée EMK, Muñoz C, Niu M, Nozière P, Pacheco D, Prestløkken E, Reynolds CK, Schwarm A, Spek JW, Terranova M, Vanhatalo A, Wattiaux MA, Weisbjerg MR, Yáñez-Ruiz DR, Yu Z, Kebreab E. Prediction of nitrogen excretion from data on dairy cows fed a wide range of diets compiled in an intercontinental database: A meta-analysis. *J Dairy Sci*. 2022; 105 (9): 7462–7481. DOI: 10.3168/jds.2021-20885.

3. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes, Strasbourg: Council of Europe; March 1986. Available at: https://rm.coe.int/168007a67b
4. Gregorini P, Beukes PC, Hanigan MD, Waghorn G, Muetzel S, McNamara JP. Comparison of updates to the Molly cow model to predict methane production from dairy cows fed pasture. *J Dairy Sci*. 2013; 96 (8): 5046–5052. DOI: 10.3168/jds.2012-6288.
5. Hall MB. Invited review: Corrected milk: Reconsideration of common equations and milk energy estimates. *J Dairy Sci*. 2023; 106 (4): 2230–2246. DOI: 10.3168/jds.2022-22219.
6. Hossein-Zadeh NG. Milk urea nitrogen is genetically associated with production and reproduction performance of dairy cows: A meta-analysis. *Livestock Sci*. 2024; 283: 105461. DOI: 10.1016/j.livsci.2024.105461.
7. Huhtanen P, Rinne M, Nousiainen J. A meta-analysis of feed digestion in dairy cows. 2. The effects of feeding level and diet composition on digestibility. *J Dairy Sci*. 2009; 92 (10): 5031–5042. DOI: 10.3168/jds.2008-1834.
8. Huhtanen P, Cabezas-Garcia EH, Krizsan SJ, Shingfield KJ. 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. *J Dairy Sci*. 2015; 98 (5): 3182–3196. DOI: 10.3168/jds.2014-8215.
9. Ishler VA. Interpretation of milk urea nitrogen (MUN) values. Penn State Extension, 2023. Available at: https://extension.psu.edu/interpretation-of-milk-urea-nitrogen-mun-values
10. Kondratiuk VM, Ruban SY, Borshch OO, Tsentylo LV, Vdovenko NM, Hruntkovsky MS, Rosomakha YO, Zhuravel MP *Modernization of Dairy Farms (Engineering, Feeding, Genomic Prediction)*. Kyiv, Bila Tserkva National Agrarian University, 2024: 323 p. Available at: https://dglib.nubip.edu.ua/items/8e84804d-50e0-4064-a180-5135e70bcde6 (in Ukrainian)
11. Langenfeld NJ, Payne L, Bugbee B. Colorimetric determination of urea. Utah State University; Crop Physiology Laboratory, Utah State University. 2021; 4. DOI: 10.17504/protocols.io.14egnzmzqg5d/v4.
12. Li MM, Hanigan MD. A revised representation of ruminal pH and digestive reparameterization of the Molly cow model. *J Dairy Sci*. 2020; 103 (12): 11285–11299. DOI: 10.3168/jds.2020-18372.
13. Musembei L, Bett R, Gachuiri Ch, Kibegwa F. Potential role of rumen bacteria in modulating milk production and composition of admixed dairy cows. *Lett Appl Microbiol*. 2023; 76 (2): ovad007. DOI: 10.1093/lambio/ovad007.
14. On Approval of the Procedure for Conducting Experiments on Animals by Scientific Institutions. Order of the Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine no. 249 from March 2012. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0416-12/print (in Ukrainian)
15. On the Protection of Animals from Cruelty. Law of Ukraine no. 3447-IV from February 2006. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15#Text (in Ukrainian)
16. Ostroski A, Prokopyev O A, Khanna V. Tracing nitrogen flows associated with beef supply chains: A consumption-based assessment. *Environ Sci Technol*. 2024; 58 (32): 14214–14224. DOI: 10.1021/acs.est.4c01651.
17. Quemada M, Lassaletta L. Fertilizer dependency: A new indicator for assessing the sustainability ofagrosystems beyond nitrogen use efficiency. *Agron Sustain Dev*. 2024; 44: 44. DOI: 10.1007/s13593-024-00978-0.
18. Ruban S, Shabash M, Tupitska O, Slobodyanyuk N. Effect of breed factor on urea level and blood biochemical parameters in dairy cattle. *Anim Sci Food Technol*. 2025; 16 (1): 9–25. DOI: 10.31548/animal.1.2025.09.
19. Ruban SY, Vasilevsky MV. *Organization of Normalized Feeding in Dairy Cattle Breeding*. Kyiv, Luxar, 2015: 136 p. (in Ukrainian)
20. Souza RA, Tempelman RJ, Allen MS, Weiss WP, Bernard JK, VandeHaar MJ. Predicting nutrient digestibility in high-producing dairy cows. *J Dairy Sci*. 2018; 101 (2): 1123–1135. DOI: 10.3168/jds.2017-13344.
21. Souza VC., Aguilar M, Amburgh MV, Nayananjalie WAD, Hanigan MD. Milk urea nitrogen variation explained by differences in urea transport into the gastrointestinal tract in lactating dairy cows. *J Dairy Sci*. 2021; 104 (6): 6715–6726. DOI: 10.3168/jds.2020-19787.
22. Spek JW, Bannink A, Gort G, Hendriks WH, Dijkstra J. 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. *J Dairy Sci*. 2013; 96 (9): 5734–5745. DOI: 10.3168/jds.2013-6842.
23. The mun money pit: Why you're flushing thousands down the drain every month. *The Bullvine LLC*, 2025 May 1st. Available at: https://www.thebullvine.com/tag/nfc-cp-ratio
24. The role of crude protein in cattle health and nutrition. *StarBlends*. Available at: https://www.starblends.com/news/crude-protein
25. Wattiaux MA, Aguerre MJ, Powell M. Background and overview on the contribution of dairy nutrition to addressing environmental concerns in Wisconsin: nitrogen, phosphorus, and methane. *La Ganadéría Ante el Agotamiento de los Paradigas Dominantes*. 2011; 1: 111–139. Available at: https://www.researchgate.net/publication/283994259
26. Zhao X, Zang C, Zhao S, Zheng N, Zhang Y, Wang J. Assessing milk urea nitrogen as an indicator of protein nutrition and nitrogen utilization efficiency: A meta-analysis. *J Dairy Sci*. 2025; 108 (5): 4851–4862. DOI: 10.3168/jds.2024-25656.
27. Zhao X, Zheng N, Zhang Y, Wang J. The role of milk urea nitrogen in nutritional assessment and its relationship with phenotype of dairy cows. A review. *Anim Nutr*. 2024; 20: 33–41. DOI: 10.1016/j.aninu.2024.08.007.

Modelling the impact of changes in productive indicators in dairy cows on the efficiency of feed nitrogen utilization

S. Y. Ruban, M. L. Shabash
rubansy@gmail.com
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony str., Kyiv, 03041, Ukraine

A generalized analysis of the main approaches to describing and understanding the characteristics of the regulation of the breakdown and fermentation of feed nutrients in cows is presented using the example of the 'Molly Model'. The research was based on data from 595 Holstein cows kept at the Kolos Agricultural Firm LLC in the Kyiv region. An analysis was conducted of the relationship between such 'output' parameters as: milk yield, fat, protein, lactose content, milk urea nitrogen (MUN), live weight of cows, and milk yield adjusted for energy content (ECM). MUN values were used as the main biomarker. Calculations were made of the efficiency of nitrogen use for milk production (MNE, milk nitrogen is effective) depending on productivity indicators. Based on regression analysis, the following reliable dependencies were obtained: MNE — daily milk yield +3.29; MNE — milk fat content - 5.93; MNE — milk protein content -42.32; MNE — lactose content in milk -17.45; MNE — MUN -2.49; MNE — live weight of the cow -0.07; MNE — milk yield adjusted for energy content +3.12. Based on the obtained regression coefficients, possible changes in nitrogen use efficiency were modeled, where an increase in the absolute values of indicators such as fat, protein and lactose content in milk, MUN, live weight of cows and MNE leads to a decrease, and when the daily milk yield and milk yield adjusted for energy content increase, there is an increase in the MNE of the diet for milk production. The data obtained indicate the possibility of using individual or group values of MUN and MNE content in milk production in assessment and selection programs for reliable prediction of the effect obtained for milk productivity, milk composition and production efficiency.

Key words: milk urea nitrogen (MUN), milk nitrogen efficiency (MNE), protein, fat, lactose