

УДК 636.2.034.082:575

DOI: <https://doi.org/10.31073/abg.71.15>

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ФЕНОМІКИ В ПРОГРАМАХ ВІДБОРУ МОЛОЧНОЇ ХУДОБИ

С. Ю. РУБАН, М. Л. ШАБАШ

*Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)**<https://orcid.org/0000-0002-8114-3665> – С. Ю. Рубан**<https://orcid.org/0009-0000-8452-2823> – М. Л. Шабаш**rubansy@gmail.com*

Методологія сучасних програм відбору в молочному скотарстві ефективно реалізується в референтних популяціях тварин, які генотиповані та фенотиповані за великою кількістю ознак. Такий набір даних є критично важливим для селекції, оскільки забезпечує основу для оцінювання та прогнозування племінної цінності молодих тварин за низкою напрямів. Водночас він може бути пов'язаний із харчовою цінністю молока (медичний аспект) та ефективністю використання кормового білка коровами, що є важливою економічною складовою молочного виробництва.

У роботі обговорено медичні аспекти впливу рівня сечовини в молоці (MUN) та залишкового азоту на формування мікробіоти споживачів такого молока і пов'язані з цим наслідки для стану їхнього здоров'я. Розглянуто можливості оцінки рівня MUN як важливого предиктора ефективності використання азоту (MNE) корму при виробництві молока. Виявлено статистично значущу регресійну залежність впливу рівня MUN на показник MNE у виробництві молока ($b = -2,495 \pm 0,209$). Для відбору кращих тварин рекомендовано проводити їх оцінювання в межах оптимального діапазону значень MUN на рівні 8–12 мг/дл, за яких спостерігаються вищі значення MNE та більші ефективне виробництво молока. Низькі значення MUN (< 8–10 мг/дл) можуть свідчити про дефіцит білка в раціоні, що часто пов'язано зі зниженням активності рубцевих мікроорганізмів і, відповідно, може призводити до обмеження молочної продуктивності та синтезу молочного білка.

Ключові слова: феноміка; азот сечовини молока (MUN); молочні корови; ефективність використання азоту для виробництва молока (MNE)

EXPANDING THE POSSIBILITIES OF PHENOMICS IN DAIRY CATTLE SELECTION PROGRAMMES

S. Y. Ruban, M. L. Shabash

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

The methodology of modern selection programmes in dairy cattle breeding is effectively implemented in reference animal populations that are genotyped and phenotyped for a large number of traits. Such a data set is critical for selection because it provides a basis for assessing and predicting the breeding value of young animals in a number of areas. At the same time, it can be linked to the nutritional value of milk (medical aspect) and the efficiency of feed protein utilisation by cows, which is an important economic component of dairy production.

The paper discusses the medical aspects of the impact of milk urea nitrogen (MUN) and residual nitrogen on the formation of the microbiota of consumers of such milk and the associated consequences for their health. The possibilities of assessing MUN as an important predictor of feed nitrogen efficiency (MNE) in milk production are considered. A statistically significant regression dependence of MUN on MNE in milk production ($b = -2.495 \pm 0.209$) was found. To select the best animals, it is recommended to evaluate them within the optimal range of MUN values of 8–12 mg/dl, at which higher MNE values and more efficient milk production are observed. Low MUN values (< 8–

10 mg/dl) may indicate a protein deficiency in the diet, which is often associated with a decrease in rumen microorganism activity and, accordingly, may lead to reduced milk productivity and milk protein synthesis.

Keywords: phenomics; milk urea nitrogen (MUN); energy-corrected milk (ECM); dairy cows; milk nitrogen efficiency (MNE)

Вступ. За даними Cole et al. (2020), феноміка надає ключову інформацію для прийняття точних рішень у сфері генетичного покращення та оперативного управління на фермі. Особливо важливою вона є у випадках, коли такі рішення пов'язані з ефективним використанням ресурсів, покращенням здоров'я та добробуту тварин, підвищенням їхньої стійкості до умов навколишнього середовища або отриманням продукції високої якості.

При цьому феноміка розглядається як міждисциплінарна галузь, що вивчає організми в процесі онтогенезу, а останнім часом – і філогенезу, на основі фізичних та біохімічних характеристик із подальшою оцінкою впливу генетичних мутацій або змін навколишнього середовища.

У сучасних програмах відбору (Ruban & Danshyn, 2025) саме феноміка поєднує генетичні особливості зі спостережуваними характеристиками організмів (фенотипом), сприяючи виявленню надійних апостеріорних закономірностей (від лат. *a posteriori* – «на основі наступного досвіду»). Такі закономірності формуються на підставі попереднього практичного досвіду або в результаті безперервного накопичення та аналізу нових даних.

За даними Rexroad et al. (2019), план досліджень з геноміки в тваринництві США протягом останніх десяти років був спрямований на подолання розриву між геномом і фенотипом. Основну увагу в цих дослідженнях приділяли інтерпретації механізмів, за допомогою яких інформація, закодована в геномі, трансформується у фенотип, що має ключове значення для отримання продукції високої якості та збереження здоров'я тварин.

Як правило, це величезні масиви структурованої та неструктурованої інформації (Big Data – великі масиви даних), обсяги яких постійно зростають і які часто неможливо ефективно обробити класичними методами аналізу.

За Bernardo (<https://www.uv.es/bernardo/BayesStat.pdf>) саме Байєсівські методи формують цілісну парадигму (*paradeigma* – зразок, модель) як для статистичного висновку, так і для прийняття рішень в умовах постійної невизначеності. Вони можуть бути виведені з аксіоматичної системи, що забезпечує загальну й внутрішню узгоджену методологію моделювання невизначеності. Завдяки цьому байєсівські підходи широко застосовуються в машинному навчанні, генетиці, біології, медицині, банківській сфері та інших галузях, де необхідне прийняття обґрунтованих рішень за неповної інформації. Таким чином, байєсівське висновування (*Bayesian inference*) – це процес уточнення ймовірності гіпотези за допомогою правила Байєса у міру надходження додаткових даних. Саме використання нової інформації, зокрема якісних і кількісних характеристик, дає змогу отримувати більш точні та надійні оцінки (Ruban & Danshyn, 2025). У цій ситуації принципового значення набуває обґрунтування та відбір таких предикторів, які в поєднанні з іншими ознаками забезпечують точніше прогнозування майбутніх значень досліджуваних явищ або подій.

Лише для голштинської породи у США оцінюють близько 42 економічно важливих ознак, серед яких: 5 ознак продуктивності; 8 показників здоров'я, фертильності та довголіття; 6 прямих показників здоров'я; 5 ознак, пов'язаних з отеленням; 18 ознак екстер'єру (Holstein Association USA Inc., 2017; VanRaden, 2017). Кожна з цих ознак безпосередньо пов'язана з прибутковістю корів, а загальний селекційний індекс використовуються для об'єднання такої інформації в єдину величину для відбору кращих тварин.

Останніми роками дедалі більше уваги приділяється харчовій цінності та якості продуктів, у зв'язку з чим до переліку контрольованих показників було включено вміст репродуктивних гормонів, співвідношення жирних кислот, а також рівень залишкового азоту (<https://www.redtractor.org.uk/>).

De Marchi et al. (2014) та Gengler et al. (2016) акцентують увагу на використанні детального аналізу молока як предиктора корельованих фенотипів для ознак, пов'язаних зі складом молока, фізіологічним станом та загальним станом здоров'я корови. Автори пропонують вивчати молоко через спектр поглинання, пропускаючи інфрачервоне світло через зразок, а отримані характеристики використовувати для розробки предикторів різних фенотипів. Це сприяє широкомасштабному та відносно недорогому фенотипуванню, оскільки зразки для середньо-інфрачервоної спектроскопії (MIR) від кожної корови можуть бути зібрані оперативно та з великою кількістю повторів.

Наявність таких даних дає змогу розраховувати генетичні кореляції між ознаками та здійснювати моделювання динаміки змін економічно важливих показників молочної худоби, зокрема вмісту жиру та білка в молоці, рівня тільності дочок, продуктивного довголіття, залишкового споживання корму та рівня соматичних клітин. Це особливо важливо під час відбору за такими ознаками, як молочна продуктивність, кількість молочного жиру та білка (Ruban et al., 2025).

Cole et al. (2020) наголошують на організаційній складності впровадження нових технологій, оскільки частина з них є запатентованою і, відповідно, не може бути піддана незалежній валідації. Це складне завдання, оскільки часто такі дані отримуються або зберігаються в ізольованих або закритих пропріетарних (від англ. *proprietary* – приватний, власний) системах. Так, за даними Danchenko (2025), у переробній молочній галузі України спостерігається певний брак прозорості, коли такі підприємства можуть контролювати рівень азоту сечовини молока й в певний момент висунути цінові претензії до товаровиробника, який не визначає цей показник у своїх лабораторіях за відсутності належного обладнання або підготовлених фахівців.

Останніми роками все більше уваги приділяється зростанню обсягів даних, доступних для всіх зацікавлених сторін, зокрема в науковій сфері серед прихильників концепцій «великих даних», «машинного навчання» та «штучного інтелекту» (Cole et al., 2012; Lokhorst et al., 2019). Cole et al. (2020) акцентують увагу на тому, що нові підходи супроводжуються власними викликами від упередженості (Castelvecchi, 2016) до інтерпретованості (Gilpin et al., 2018) з можливостями переоцінювати отримані результати. Водночас такі, інколи навіть фантастичні, очікування мають слугувати інтересам виробників молочної продукції, переробних підприємств і, що найголовніше, споживачів – насамперед за рахунок виробництва безпечної та здорової їжі в умовах ефективного й сталого виробництва.

Schimmel et al. (2021) наводять приклад з медичної практики про вплив мікробіоти на засвоєння та переробку азоту з грудного молока матері. Джерела азоту в такому молоці, зокрема сечовина, можуть сприяти формуванню специфічного мікробіому на ранніх стадіях життя, при цьому сечовина становить значну частку небілкового азоту. Виявлено, що грампозитивна анаеробна бактерія *B. longum* subsp. *infantis* (ATCC 17930) здатна використовувати сечовину як основне джерело азоту для росту в синтетичному середовищі, а активність ферментів індукується наявністю сечовини в такому середовищі. Автори також підтвердили експресію як субодиноць білка уреазы, так і допоміжних білків *B. longum* subsp. *infantis* за допомогою протеоміки. Було виявлено, що мікробіом немовлят, яких годують материнським молоком, містить більше генів, пов'язаних з уреазою, ніж у немовлят, яких годують сумішшю.

За даними You et al. (2023), молоко матері відіграє ключову роль у формуванні структури та функцій мікробних спільнот коменсальних мікроорганізмів (від лат. *cum* – «разом» і *mensa* – «стіл», форма симбіотичної взаємодії, за якої один організм – коменсал – отримує користь, не завдаючи шкоди іншому), що колонізують кишечник немовляти, яке вигодовується материнським молоком. Неперетравлювані молекули, розчинені в такому молоці, створюють мікробіом, у якому часто домінують біфідобактерії, здатні використовувати ці субстрати. Сечовина становить біля 15% від загальної кількості азоту молока, що є потенційним резервуаром для мікробіоти, яка може бути використана для критично важливих метаболічних операцій під час лактації та неонатального розвитку. Відповідно, штами *B. infantis* здатні використовувати

азот сечовини, що становить раніше гіпотетичний фенотип у коменсальних бактерій, що живуть у людини. Це переконливо демонструє, що раніше недоступний азот сечовини, після включення до складу мікробних метаболітів, стає доступним для використання немовлям-господарем. Загалом, *B. infantis* має необхідну фенотипічну основу для участі в рециркуляції азоту сечовини людського молока в організмі свого немовляти-господаря, й таким чином, може бути ключовим фактором гомеостазу азоту на ранніх стадіях життя.

Suzuki et al. (2025) наводять дані щодо потреб дорослого населення в азоті за останні п'ятдесят років, отримані з використанням методу азотного балансу. Мета-аналізи підтвердили узгодженість із попередніми дослідженнями. На думку авторів потреби в азоті, засновані на методі азотного балансу, слід продовжувати використовувати для запобігання дефіциту білка, але фізіологічно цей метод відображає адаптацію людини до низького рівня білка, хоча механізм, що лежить в його основі, залишається неясним. Тому накопичення даних на індивідуальному рівні при зміні традицій та рівня харчування, стануть важливою основою для переоцінки потреб в азоті.

За Qu et al. (2025), різні дієтичні фактори, присутні в материнському молоці, є важливими поживними компонентами у формуванні кишкової мікробіоти немовляти. Вони впливають на чисельність корисних мікробних родів, зокрема *g_Bifidobacterium*, *g_Bacteroides* та *g_Blautia*. Fan (2021) довів, що формування кишкової мікробіоти новонародженого протягом перших місяців життя є організованим процесом, який призводить до формування спеціалізованих мікробних екосистем у різних відділах кишечника. Цей процес значною мірою залежить від факторів навколишнього середовища, і багато доказів свідчать про те, що рання бактеріальна колонізація кишечника має довгострокові наслідки для травного та імунного гомеостазу хазяїна, а також для його метаболізму й поведінки. Тому ранній період життя є «вікном можливостей» для програмування здоров'я шляхом модуляції мікробіоти.

З огляду на довгостроковий вплив ранніх харчових і мікробіомних факторів на метаболізм організму, все більшої актуальності набувають ознаки, пов'язані з ефективністю використання поживних речовин у подальші періоди життя тварин.

Ефективність використання корму в скотарстві залишається на найближчу перспективу основним трендом у програмах відбору, оскільки дає можливість здешевити виробництво продукції за рахунок зменшення основної статті виробничих витрат, пов'язаних з кормами (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 надалі відповідний рівень та склад молочної продукції, впливаючи на стан здоров'я та величину втрат N в навколишнє середовище (Ruban & Vasilevsky, 2015; Borshch, 2023). Являючись основним компонентом амінокислот, баланс яких у рубці впливає на синтез мікробного білка, N залишається важливим фактором для успішного процесу перетравлення корму та використанням його мікробіотою хазяїна. За даними Badhan et al. (2025) більшість енергії та білка постачаються жуйними в результаті ферментації мікробіомом рубця, що відіграє ключову роль у визначенні ефективності її годування та викидів метану (CH₄). Для оцінки рівня N в 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 DMI (dry matter intake). Huhtanen et al. (2015) запропонували використовувати концентрацію азоту сечовини молока (NMCE), рівень якої залежить від концентрації та споживання сирого протеїну в раціоні. Для цього NMCE використовується в якості біомаркера ефективності використання N для виробництва молока лактуючих корів – MNE. За даними Souza et al. (2021), Wattiaux et al. (2011) азот сечовини молока (MUN) та азот сечовини крові корелюють з балансом та виділенням азоту. Однак, існує також генетична компонента концентрацій MUN, яка може бути пов'язаною з відмінностями в транспорті сечовини. Було висунуто гіпотезу, що частина варіацій концентрацій MUN серед корів викликана відмінностями у шлунково-кишковому та нирковому кліренсі сечовини. В роботі Ruban et al. (2025) доведено суттєвий вплив фактору породи за такими біохімічними показниками крові як рівень загального білірубіну

24,7%, сечовини 33,2%, креатиніну 49,8%, аланінамінотрансферази 10,4%, аспартатамінотрансферази 46,3%, альбуміну 35,1% і загального білка 13,2%.

Аналіз та попередні аналітичні звіти Zhao et al. (2025) показують, що концентрація сирого протеїну CP (англ. crude protein) у раціоні не є єдиним фактором харчування, який впливає на концентрацію MUN. Рівень у раціоні неструктурних вуглеводів – NFC (англ. Non fiber carbohydrate), до яких входять цукор, крохмаль і пектин, також відіграє важливу роль. Авторами наведено результати лінійного регресійного аналізу для 91 набору експериментальних даних, що відображають залежність між співвідношенням NFC/CP у «вхідному» раціоні та концентрацією MUN (мг/дл), коефіцієнт кореляції при цьому 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 успадкованості для MU та MUN, які були низькими й дорівнювали 0,202 та 0,181 відповідно. Оцінки генетичних кореляцій між MUN та продуктивними ознаками були загалом низькими й коливалися від –0,039 між MUN і відсотковим вмістом лактози в молоці до 0,102 між MUN та виходом молочного білка. Також виявлено слабку негативну кореляцію між MUN і балом соматичних клітин (–0,070), тоді як помірна позитивна кореляція спостерігалася між MUN та виходом молочного білка (0,357).

Метою дослідження було 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 MNE.

Матеріали та методи дослідження. Матеріалом для досліджень слугували дані експерименту, проведеному на 595 коровах голштинської породи в умовах Товариства з обмеженою відповідальністю «Агрофірма «Колос» Київської області. При виконанні експериментальних досліджень, наведених у 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). У господарстві використовують прив'язну систему утримання з доїнням у молокопровод. Доїння трьох разове при обслуговуванні одним дояром до 50 корів. Годівля здійснюється з використанням загально змішаного раціону (TMR) характеристика якого представлена в таблицях 1, 2.

1. Характеристика TMR суміші корів голштинської породи

Інгредієнти раціону	Вага, кг		Відсоток	
	фізична	за сухою речовиною	за фізичною вагою	за сухою речовиною
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

Примітки: розраховували 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

Співвідношення NFC/CP є важливим показником, оскільки воно впливає на рівень молочної продуктивності, зокрема на синтез молочного білка, а також може зумовлювати ризики для здоров'я та відтворної здатності 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). Згідно з загально прийнятими нормами, рівень NFC у TMR визначалось шляхом віднімання рівня цих компонентів у відсотках за сухою речовиною в 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.

2. Біохімічна характеристика загально змішаного раціону корів дійних

Компонент	Вміст по сухій речовини, %	Вміст, г
CP*	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 NFC до CP у раціоні

Джерело: за результатами хімічного аналізу компанії АВМ від 25.04.2025

Для оцінки ефективності використання азоту при виробництві молока використано модель (1) для прогнозування за Huhtanen et al. (2015), яка розроблена на основі залишкової дисперсії, для прогнозування багатофакторної нестабільності (MNE) виробничих даних та 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, що надходить із кормом, для синтезу молока.

Аналіз якісних та біохімічних показників молока визначали на ультразвуковому аналізаторі «ЕКОМІLK Bond». Кількість сечовини в молоці визначали діацетилмонооксимним методом. Про її рівень судили за вмістом червоного комплексу, утвореного сечовиною з діацетилмонооксимом у кислому середовищі в присутності тіосемікарбозіда й тривалентного заліза за методикою Langenfeld et al. (2021). Молярну концентрацію сечовини (С), виражену в ммоль/л, визначали на основі значень оптичної густини досліджуваної проби А відносно стандарту В за формулою (2):

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

Дисперсійний аналіз впливу року-місяця отелення, бугая-плідника (батька) й номера лактації на MNE раціону для виробництва молока проводився з використанням лінійної моделі (3):

$$y_{ij} = a_i + b_j + c_k + e_{ij} \quad (3)$$

де y_{ij} – MNE раціону для виробництва молока; a_i – ефект i -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 (4):

$$\eta^2 = (SSA/SSП) \cdot 100\% \quad (4)$$

де SSA – сума квадратів відхилень, обумовлена впливом фактора, $SSП$ – загальна сума квадратів відхилень.

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 (5):

$$y = a + b \cdot x + e \quad (5)$$

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

За якісними показниками молока досліджувані тварини були об'єднані в загальну вибірку, що дало змогу на основі «змішаної моделі» розрахувати вплив таких факторів як «Рік-місяць отелення», «Бугай-плідник», «Номер лактації» (табл. 3).

3. Описова статистика досліджуваних ознак (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
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
Ефективність використання азоту раціону для виробництва молока (MNE*)	116,6	365,5	287,6 ± 1,65	1622,6	40,3	14,0

Примітки: * MNE ефективність використання азоту для виробництва молока визначається як співвідношення споживання азоту, до азоту в молоці

Джерело: розроблено авторами на основі досліджень

Результати дослідження. В таблиці 4 представлені результати дисперсійного аналізу впливу року-місяця отелення, бугая-плідника (батька) і номеру лактації на MNE раціону для виробництва молока.

4. 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: * – $P > 0,95$; ** – $P > 0,99$; *** – $P > 0,999$

Джерело: розроблено авторами на основі досліджень

З досліджених факторів лише рік-місяць отелення вірогідно впливав на MNE раціону для виробництва молока.

Можна констатувати суттєвий вплив організованих факторів, зокрема незначних змін (маніпуляцій) у годівлі в різні сезони та місяці року, а також коливань температурного режиму на фермі впродовж різних періодів року. Вплив не генетичних факторів був доволі високим за добовим надоем, вмістом жиру, білка та лактози, а також MNE. Для оцінки саме генетичної компоненти впливу на ці показники, на думку авторів, доцільно використовувати не їх абсолютні значення, а характер змін упродовж певного періоду часу в розрізі генетичних груп, пов'язуючи такі зміни з нормою реакції «генотип – середовище».

Значення фенотипових коефіцієнтів кореляції між добовим надоем та основними компонентами молока (вміст жиру, білка, лактози), а також рівнем сечовини в молоці (MUN) та MNE (табл. 5), дали змогу виявити вірогідні залежності.

5. Коефіцієнти фенотипової 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: * – $P > 0,95$; ** – $P > 0,99$; *** – $P > 0,999$

Джерело: розроблено авторами на основі досліджень

Так, значення ефективності використання азоту для виробництва молока (MNE) від'ємно корелює з вмістом жиру в молоці ($-0,1980 \pm 0,0412$ ***), білка в молоці ($-0,2234 \pm 0,0410$ ***), лактози в молоці ($0,1719 \pm 0,0414$ ***), вмісту азоту сечовини в молоці ($-0,4489 \pm 0,0376$ ***). Виявлено також позитивний кореляційний зв'язок ($0,8449 \pm 0,0225$ ***) між надоем та MNE для виробництва молока, та від'ємний високо вірогідний між MNE та MUN ($-0,4489 \pm 0,0376$ ***).

Для більш практичного застосування наведених у таблиці 5 результатів, нами проведено розрахунки регресійної залежності (b) виробництва молока та MUN (x) на MNE (табл. 6).

6. 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: *** – $P > 0,999$

Джерело: розроблено авторами на основі досліджень

За результатами експериментів Huhtanen et al. (2015), 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 надюю молока як незалежних змінних. Musembei et. al. (2023) 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. (2024) можна констатувати: 1) будь-які фактори, що викликають зміни MUN, можуть впливати на компоненти молока; 2) збільшення споживання СР, що супроводжується підвищенням концентрації MUN, не впливає на вихід молочного білка, тоді як низький вміст СР 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 складом 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. (2024), 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 (Fedota et al., 2020).

На рисунку 1 наведено регресійну залежність основного показника MUN на NME при виробництві молока.

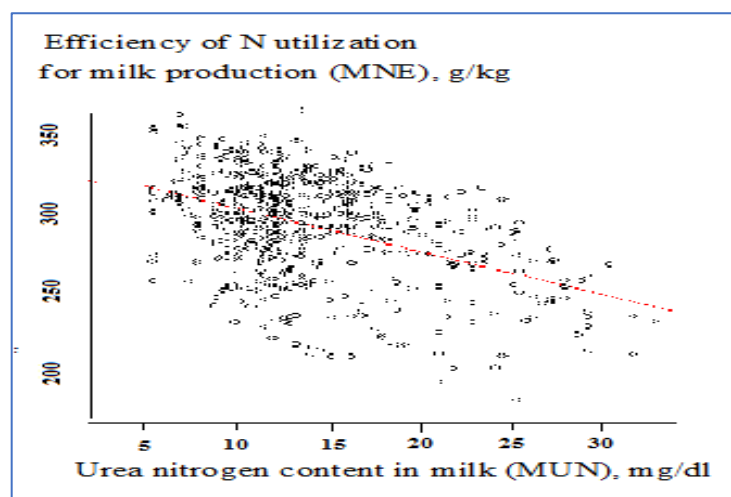


Рис. 1. Регресійна залежність ($b = -2,495 \pm 0,209$) впливу вмісту азоту сечовини в молоці (MUN) на ефективність використання азоту на виробництво молока (NME)

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. (2015), 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 (2023), 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 Nuhtanen et al. (2015), Ishler (2023) та отримані результати в цій роботі (рис. 1) зроблено попередні висновки про коректність оцінок ефективності використання 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.

Висновки. Такі компоненти молока, як вміст жиру, білка, рівень лактози та MUN, характеризуються широким діапазоном фенотипової мінливості, що відображає складні біохімічні процеси в організмі жуйних тварин і вплив багатьох чинників на формування цих показників. Нами не виявлено суттєвого впливу генетичної компоненти (походження за батьком) на значення MUN. Попередні припущення вказують про 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 потрібно будувати на основі аналізу динаміки повторів оцінок MUN у часі в розрізі таких генетичних груп.

Подальше продовження досліджень у цьому напрямі дасть змогу розширити обсяг аналітичних даних і, в поєднанні з методами оптимізації та моделювання, сформулювати конкретні рекомендації щодо використання таких комплексних оцінок у практиці. Пропонується використовувати індивідуальні або групові значення показників MUN і MNE у програмах оцінки та відбору з метою надійного прогнозування ефекту за молочною продуктивністю, складом молока та загальною ефективністю виробництва.

REFERENCES

- 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>
- Bernardo, J. M. (2015). *Bayesian statistics*. Valencia: Departamento de Estadística, Universidad de Valencia. URL: <https://www.uv.es/bernardo/BayesStat.pdf>
- Borshch, O. O. (2023). Vplyv hlobalnykh zmin klimatu na okremi elementy tekhnolohii vyrobnytstva moloka [The impact of global climate change on individual elements of milk production technology] (Doctor's thesis). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. [In Ukrainian].
- Castelvecchi, D. (2016). Can we open the black box of AI? *Nature*, 538, 20–23. <https://doi.org/10.1038/538020a>
- Cole, J. B., Eaglen, S. A. E., Maltecca, C., Mulder, H. A., & Pryce, J. E. (2020). The future of phenomics in dairy cattle breeding. *Animal Frontiers*, 10 (2), 37–44. <https://doi.org/10.1093/af/vfaa009>
- Cole, J. B., Newman, S., Foerster, F., Aguilar, I., & Coffey, M. (2012). Really big data: processing and analysis of large datasets. *Journal of Animal Science*, 90, 723–733. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4584>
- Danchenko, B. S. (2025). Modernizatsiia fermi z vyrobnytstva moloka na prykladi FH «Fylenkivske» Poltavskoi oblasti [Modernization of a milk production farm on the example of the private farm “Fylenkivske” in Poltava region] (Master's qualification thesis). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. [In Ukrainian].

- De Marchi, M., Toffanin, V., Cassandro, M., & Penasa, M. (2014). Mid-infrared spectroscopy as phenotyping tool for milk traits. *Journal of Dairy Science*, 97, 1171–1186. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6799>
- European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes (1986). Council of Europe, Strasbourg. <https://rm.coe.int/168007a67b>
- Fan, Y., & Pedersen, O. (2021). Gut microbiota in human metabolic health and disease. *Nature Reviews Microbiology*, 19 (1), 55–71. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0433-9>
- 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>
- 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, 4071–4083. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10140>
- Gilpin, L. H., Bau, D., Yuan, B. Z., Bajwa, A., Specter, M., & Kagal, L. (2018). Explaining explanations: An overview of interpretability of machine learning. *IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, Turin, 1–3 October 2018, 80–89.
- Holstein Association USA Inc. (2017). TPI formula (August 2017). https://www.holsteinusa.com/genetic_evaluations/ss_tpi_formula.html
- Hosseini-Zadeh, N. G. (2024). Milk urea nitrogen is genetically associated with production and reproduction performance of dairy cows: A meta-analysis. *Livestock Science*, 283, Art. 105461. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105461>
- 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>
- Ishler, V. A. (2023). Interpretation of milk urea nitrogen (MUN) values. <https://extension.psu.edu/interpretation-of-milk-urea-nitrogen-mun-values>
- 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). *Modernizatsiia ferm z vyrobnytstva moloka (inzhynerinh, hodivlia, henomne peredbachennia)* [Modernization of dairy farms (engineering, feeding, genomic prediction)]. PE O. V. Yamchynskiy. [In Ukrainian].
- Langenfeld, N., Laurenpayne, & Bugbee, B. (2021). Colorimetric determination of urea (V. 4). Utah State University, Crop Physiology Laboratory. <https://doi.org/10.17504/protocols.io.14egnmzqg5d/v4>
- Lokhorst, C., de Mol, R. M., & Kamphuis, C. (2019). Big data in precision dairy farming. *Animal*, 13, 1519–1528. <https://doi.org/10.1017/S1751731118003439>
- 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>
- Qu, Z., Zhang, B., Lin, G., Guo, M., Wang, L., Chen, W., & Zhang, H. (2025). Dietary nucleotides drive changes in infant fecal microbiota in vitro and gut microbiota–gut–brain development in neonatal rats. *Food Chemistry*, 463, Art. 141333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141333>
- Red Tractor Assurance (n. d.). Red Tractor standards. <https://redtractor.org.uk/>
- Rexroad, C., Vallet, J., Matukumalli, L. K., Reecy, J., & Bickhart, D. (2019). Genome to phenome: Improving animal health, production, and well-being — a new USDA blueprint for animal genome research 2018–2027. *Frontiers in Genetics*, 10, Art. 327. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00327>
- Ruban, S. Y., & Danshyn, V. O. (2025). Methodology of modern selection programs in dairy cattle breeding. *Animal Breeding and Genetics*. Kyiv, 70, 209–226. <https://doi.org/10.31073/abg.70.20>
- Ruban, S. Y., & Vasilevsky, M. V. (2015). *Orhanizatsiia normovanoi hodivli v molochnomu skotarstvi*. [Organization of normalized feeding in dairy cattle breeding]. Luxar. [In Ukrainian].

- Ruban, S., Danshyn, V., Borshch, O., Zbroi, M., & Fedota, O. (2025). Latent phenotype potential: Modelling response to selection for dairy cattle productivity traits considering genetic correlations. *Animal Science and Food Technology*, 16 (4), 9–27. <https://doi.org/10.31548/animal.4.2025.9>
- 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>
- Schimmel, P., Kleinjans, L., Bongers, R. S., Knol, J., & Belzer, C. (2021). Breast milk urea as a nitrogen source for urease-positive *Bifidobacterium infantis*. *FEMS Microbiology Ecology*, 97, Art. fiab019. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiab019>
- 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., Van Amburgh, M. E., 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>
- Suzuki, D., Hayamizu, K., Uno, C., Hasegawa, Y., Kuwahata, M., & Kido, Y. (2025). Nitrogen requirements in healthy adults: A systematic review and meta-analysis of nitrogen balance studies. *Nutrients*, 17 (16), Art. 2615. <https://doi.org/10.3390/nu17162615>
- Tekhnichniy komitet «Moloko, miaso ta produkty yikh pererobky» (TK 140). (2018). Moloko koroviache syre: Tekhnichni umovy. Syre koroviache moloko. Tekhnichni kharakterystyky (ДСТУ 3662:2018) [Raw cow milk: Technical specifications. *Raw Cow Milk. Specifications (DSTU 3662:2018)*]. [In Ukrainian].
- The Bullvine. (2025). The MUN money pit: Why you're flushing thousands down the drain every month. <https://www.thebullvine.com/tag/nfc-cp-ratio/>
- VanRaden, P. M. (2017). Net merit as a measure of lifetime profit: 2017 revision. *AIP Research Report NM\$6 (2–17)*. <https://www.aipl.arsusda.gov/reference/nmcalc-2017.htm>
- 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: Alvarez C. F. M. (Ed.), *La Ganadería Ante el Agotamiento de los Paradigmas Dominantes* (Vol. 1, S. 111–139). Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.researchgate.net/publication/283994259>
- You, X., Rani, A., Özcan, E., Lyu, Y., & Sela, D. A. (2023). *Bifidobacterium longum* subsp. *infantis* utilizes human milk urea to recycle nitrogen within the infant gut microbiome. *Gut Microbes*, 15 (1), Article: 2192546. <https://doi.org/10.1080/19490976.2023.2192546>
- Zakon Ukrainy Pro zakhyst tvaryn vid zhorstokoho povodzhennia No. 3447-IV. (2006). [Law of Ukraine On the Protection of Animals from Cruelty No. 3447-IV]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15#Text> [In Ukrainian].
- Zhao, X., 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>
- Zhao, X., Zheng, N., Zhang, Y., & Wang, J. (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>