


БІОТЕХНОЛОГІЯ ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.27:66.011

Сучасна біотехнологія у силосуванні

Чернюк С.В. , Крижак М.С. 

Білоцерківський національний аграрний університет

 E-mail: Чернюк С.В. chernuksergiy@gmail.com; Крижак М.С. california2656@gmail.com

Чернюк С.В., Крижак М.С. Сучасна біотехнологія у силосуванні. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2025. № 2. С. 61–72.

Chernyuk S., Kryzhak M. Modern biotechnology in ensiling. «Animal Husbandry Products Production and Processing», 2025. № 2. PP. 61–72.

Рукопис отримано: 09.04.2025 р.

Прийнято: 22.04.2025 р.

Затверджено до друку: 27.11.2025 р.

doi: 10.33245/2310-9289-2025-198-2-61-72

У статті проаналізовано роботи українських та зарубіжних науковців, які приділяють увагу дослідженню та вдосконаленню технологій силосування. Їхні наукові роботи охоплюють широкий спектр питань – від вибору рослинних культур до розроблення нових методів консервації. Досліджено мікробіологічний процес, який використовується для збереження якості свіжого корму на тваринницьких фермах. Біохімічні та мікробіологічні зміни, які відбуваються під час силосування, сприяють пошуку нових силосних добавок, вивченню потенціалу певних мікробних штамів, які є більш ефективними у біоконсервуванні. Види молочнокислих бактерій широко відомі своїм різноманітним застосуванням як добавок у ферментації сільськогосподарських культур або фуражної біомаси під час силосування. Однак невідповідність якості силосу останнім часом можна пояснити відсутністю інформації про експресію генів і молекулярні механізми мікробіоти, задіяної у виробництві силосу. Сучасні дослідження зосереджено на розробленні багатих поживними речовинами кормів для тварин із покращеними інокулянтами лактобактерій. Сучасні біотехнологічні інструменти, такі як метагеноміка, геноміка та протеоміка, дають змогу ідентифікувати, покращувати та розробляти високопродуктивні штами лактобактерій для використання в силосуванні. Ці штами сприяють зниженню рН, покращують ферментаційні характеристики та аеробну стабільність силосу, забезпечуючи його високу якість і сприяючи сталому розвитку сільського господарства. Введення спеціальних бактеріальних культур (інокулянтів) значно покращить якість силосу, прискорюючи процес ферментації, створюючи сприятливе середовище для корисних мікроорганізмів та пригнічуючи ріст шкідливих.

У статті з'ясовано роль інокулянтів лактобактерій у виробництві силосу, а також сучасні біотехнологічні підходи, які є потужними інструментами для ідентифікації, покращення та розвитку високопродуктивних штамів лактобактерій.

Ключові слова: силосування, лактобактерії, штами інокулянтів, ферментація, біологічні добавки, поживна цінність.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Силосування – це мікробіологічний процес, який використовують для збереження свіжого корму у формі силосу для застосування на фермерських господарствах у виробництві кормів для тварин. Силос отримують із рослинних залишків, фуражної біомаси або інших сільськогосподарських і промислових побічних продуктів, які зберігаються шляхом природного або штучного підкислення, без кисню та часто використовуються як корм для тварин у періоди недостатнього корму [1, 2].

Силос виробляється шляхом бродіння рослинної біомаси з вмістом вологи зазвичай понад 50 % і залишається популярним на молочних фермах, оскільки зменшує втрати поживних речовин під час зберігання [3]. Біомаса фуражів або сільськогосподарських культур зберігається як заміник або під час дефіциту через зниження росту пасовищ або погані умови пасовища для годівлі тварин [4, 5].

Силосування є фундаментальним біологічним процесом, що є результатом спонтанної ферментації в анаеробних умовах після збирання кормових культур на найвищій стадії зрілості, подрібнення, упаковки в силос, роздавлювання та ущільнення для видалення пилу, зберігання та згодовування. Численні біологічні та технологічні фактори впливають на якість силосу після ферментації рослинної біомаси молочнокислими бактеріями для виробництва молочної кислоти та інших корисних органічних кислот і зниження рН до рівнів, що запобігають розвитку мікроорганізмів псування [6].

Спочатку було припущено, що виробництво молочної кислоти пов'язане лише з неспоровими бактеріями, які зазвичай називають лактобактеріями, через їх ферментативний спосіб життя, в основному синтезуючи різноманітні вуглеводи в молочну кислоту. У кількох напрямках біотехнології, пов'язаних з харчовими продуктами, лактобактерії відіграють ключову роль через їх безпеку для харчування людей і тварин, метаболічну гнучкість і широку екологічну адаптацію, викликаючи також інтерес для нових застосувань (включаючи промислове бродіння) [7].

Молочнокислі бактерії – це мікроорганізми, які зазвичай використовуються для збереження якості силосованих кормів. Крім того, види культур молочнокислих бактерій, застосовуваних у виробництві силосу, належать до *Enterococcus*, *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, *Weissella* та *Bacillus* [8].

Сьогодні використання культур молочнокислих бактерій у сталому сільському господарстві зумовлено їх потенціалом для покращення здоров'я людини та тварин [9]. Крім того, консервація силосу за допомогою інокулянтів культур молочнокислих бактерій вважають надійним і зручним способом зберігання свіжого корму на фермерських господарствах та в тваринництві. Однак невідповідність якості силосу останнім часом можна пояснити відсутністю інформації про експресію генів і молекулярні механізми мікробіоти, задіяної у виробництві силосу [10].

З розвитком сучасних біотехнологій, зокрема технології секвенування наступного покоління (NGS), було виявлено кілька потенційно цінних мутантів. Деякі з них було успішно перенесено на корисні мікроорганізми, які покращують якість силосу [11]. Нещодавно досягнення біотехнологій зробили можливим проведення метагеномного секвенування мікробної ДНК у силосі за допомогою різних молекулярних методів [12]. Ці методи сприяли формуванню нового уявлення про складність застосування мікробів для покращеного силосування, характеризуючи роль популяцій лактобактерій у силосі та те, як інокулянти лактобактерій можуть розвивати мікробіому, сприятливіші для виробництва високоякісного силосу [12]. Крім того, високоефективні штами для виробництва та збереження силосу можуть бути створені за допомогою зусиль щодо вдосконалення штамів, які виявилися потужними інструментами для характеристики та конструювання нових штамів лактобактерій з бажаними характеристиками [13–15]. Сьогодні важливо переглянути роль культур лактобактерій у виробництві та збереженні силосу, розробити нові підходи до покращення лактобактерій, вдосконалити технології переробки силосу для сталого сільського господарства.

Мета дослідження – обґрунтувати та сформулювати теоретичні передумови та майбутні перспективи розвитку молочнокислих бактерій для покращення силосу в кормах для сільськогосподарських тварин у господарстві.

Матеріал і методи дослідження. Під час досліджень було використано наступні методи: метод аналізу та синтезу – під час вивчення джерел наукової літератури з тематики дослідження; систематичний аналіз отриманих даних, виявлення загальних тенденцій та суперечностей; синтез результатів: формулювання висновків на основі аналізу отриманих даних.

Результати дослідження та обговорення.

1. Технологічні аспекти та біохімізм у силосуванні.

Чітке уявлення про біохімічні зміни, які відбуваються під час силосування, допомогло в пошуку нових силосних добавок, зокрема на основі унікальних штамів [14]. Певні силосні добавки можуть допомогти зменшити невідворотні втрати, особливо ті, що стосуються рослинних ферментів, мікроорганізмів або польових втрат. Силосні добавки – хімічні (сорбінова, оцтова, пропіонова та бензойна

мурашина кислоти та їх солі) та біологічні (целюлаза, гомо- та гетероферментативні лактобактерії) – а також їх різні ефекти були повністю досліджені [15, 16].

Ці силосні добавки додають до корму або біомаси сільськогосподарських культур для посилення процесу силосування (ферментації), зменшення втрат сухої речовини, зменшення аеробного погіршення під час згодовування, покращення гігієнічної якості силосу, обмеження вторинної ферментації, покращення аеробної стабільності. Це підвищує поживну цінність силосу, пригнічує діяльність патогенів і збільшує продуктивність тваринництва, забезпечуючи фермеру при-

буток більший, ніж вартість добавки. Однак біологічні добавки, особливо лактобактерії, вважають більш придатними для інокуляції силосу, ніж інші добавки, через їх безпеку та доцільність, відсутність корозії, екологічність, покращене відновлення сухої речовини, характеристики бродиння та продуктивність тварин [17].

У таблиці 1 наведено склад інокулянтів лактобактерій та інших добавок для виробництва силосу.

Рівень лактобактерій у силосі сильно варіюється, і відповідний вибір і застосування інокулянтів є вирішальними для гарної якості силосу [18].

Таблиця 1 – Композиції інокулянтів лактобактерій та інших добавок у виробництві силосу та їх вплив на збереження силосу

Силосний тип	Композиція інокулянту лактобактерій	Склад добавки	Тривалість силосування (діб)	Суша речовина (%)
Гібрид кукурудзи	<i>L. buchneri</i> (4 × 10 ⁵ КУО/г), <i>P. pentosaceus</i> (1 × 10 ⁵ КУО/г)	Меляса (3%)	7	39
Жито цільнозернове	<i>L. buchneri</i> + <i>P. acidilactici</i> (1,67 × 10 ⁵ КУО/г)	NHS* (195г L ⁻¹), гексаметилентетрамін (71г L ⁻¹), сорбат калію (2мл кг ⁻¹), BSP* (257г L ⁻¹), сорбат калію (154г L ⁻¹), пропіонат амонію (1,5 мл кг ⁻¹)	53	49
Стебло кукурудзи	<i>L. plantarum</i> (5 × 10 ⁶ КУО/г)	Акремоніум целюлаза (0,03%)	60	45
Люцерна	<i>L. plantarum</i> (1 × 10 ⁶ КУО/г)	Целюлаза (20 мг/кг)	60	41,83
Кукурудза цільного врожаю	<i>L. plantarum</i> , <i>L. paracasei</i> , <i>P. pentosaceus</i> (1,5 × 10 ¹¹ КУО/г)	Мурашина кислота (42,5%), пропіонова кислота (10,0%), форміат амонію (30,3%), бензойна кислота (2,2%)	90	33,63
Жито раннього скосу	<i>L. plantarum</i> , <i>L. paracasei</i> (1,5 × 10 ⁵ КУО/г), <i>L. buchneri</i> + <i>P. acidilactici</i> (1,67 × 10 ⁵ КУО/г)	SNHE* (2 мл кг ⁻¹), (SNHEPS* (2 мл кг ⁻¹))	64	25
Кукурудза цільного врожаю	<i>L. acidophilus</i> + <i>L. plantarum</i> (1 × 10 ⁶ КУО/г)	Мурашина кислота, оцтова кислота, пропіонова кислота (6 мгл ⁻¹)	90	32,74
Просо просо, кукурудза на силос, сорго-суданський злаковий гібрид	<i>L. plantarum</i> (1 × 10 ⁶ КУО/г)	Мурашина кислота (5 мл кг ⁻¹)	60	30,34, 27,73, 19,28

Примітки: NHS* – водна суміш нітриту натрію; BSP* – водна суміш, що містить бензоат натрію; SNHE* – нітрит натрію і гексаметилентетрамін; SNHEPS* – нітрит натрію, гексаметилентетрамін і сорбат калію.

Перед вибором відповідного інокулянту лактобактерій для виробництва силосу враховуються певні умови. Інокулянти лактобактерій відбирають для виробництва силосу після виділення відповідних штамів з наступним скринінгом, який включає визначення здатності продукувати органічну кислоту, розщеплення білка та швидкість росту за різних рН і температур, а також перевірку ефективності. Інші критерії вибору інокулянту включають природне середовище існування рослин, швидкий ріст у зрізаній або нарізаній рослинній біомасі, нечутливість до бактеріофагів, сумісність зі спільними культурами, генетичну стабільність, стійкість до стресу та інгібування цвілі та дріжджів [19, 20]. Середовище силосування та здатність лактобактерій швидко адаптуватися та метаболізувати доступні поживні речовини є критично важливими для ферментації рослинної біомаси [9, 19, 21]. На основі природної ферментації рослинної біомаси дві категорії інокулянтів лактобактерій, гомоферментативний і гетероферментативний, здебільшого розглядаються для виробництва силосу.

2. Гомоферментативні лактобактерії у виробництві силосу.

Гомоферментативні лактобактерії – найстаріші та найпоширеніші інокулянти лактобактерій для виробництва силосу [4]. Гомоферментативні лактобактерії, такі як *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus* і *Lactobacillus*, часто застосовують у виробництві силосу через їх здатність виробляти високі концентрації молочної кислоти під час бродіння [15]. Примітно, що гомоферментативні інокулянти лактобактерій зазвичай є кращими для силосу з бобових, оскільки вони мінімізують втрати сухої речовини за рахунок більшого виробництва молочної кислоти. Відомо, що інокуляція силосу є одним із найбільш часто використовуваних гомоферментативних видів лактобактерій *Lactobacillus plantarum* швидко знижує рН, пригнічує ріст патогенних мікроорганізмів і зберігає рослинні білки [22, 23, 24]. Це пояснюється стійкістю та унікальними пробіотичними властивостями *L. plantarum*, включаючи високу толерантність до кислого та жовчного середовища та антагоністичну активність. Однак інокуляція *P. Pentosaceus* у силос зумовила вищу перетравність сухої речовини, ніж *L. plantarum* [25]. Крім того, багато видів *Pediococcus* було рекомендовано для використання пробіотиками через їх антиоксидантні, протизапальні, детоксикаційні та гіполіпідемічні властивості [26]. Тим не менш,

повідомляється, що силос, заготовлений з використанням інокулянтів, в яких переважають гомоферментативні лактобактерії, покращує продуктивність тварин на 3–5 % завдяки виробленню мінімальних концентрацій етанолу, оцтової та масляної кислот, а також сприяє меншим втратам у ньому сухої речовини – на 2–3 % порівняно з інокуляцією гетероферментативними лактобактеріями [27].

3. Гетероферментативні лактобактерії у виробництві силосу.

Гетероферментативні лактобактерії здебільшого належать до родів *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Weissella* та *Lactobacillus*. Ця категорія лактобактерій утворює додаткові сполуки з гексоз, крім молочної кислоти, таких як оцтова кислота, етанол і CO_2 [27], і вважається найпоширенішою популяцією лактобактерій, яка виробляє значні концентрації оцтової кислоти шляхом перетворення молочної кислоти під час бродіння. Оскільки помірне утворення оцтової кислоти має потенціал для інгібування дріжджів і цвілі, які ініціюють псування у разі контакту з повітрям, гетероферментативні інокулянти лактобактерій є цінними для зменшення втрат DM, покращення аеробної стабільності та зменшення втрат у разі виведення [27]. Однак лише деякі види з групи *Lactobacillus* було вивчено щодо їх ефективності у виробництві силосу, включаючи *L. buchneri* і набагато рідше *L. kefirii*, *L. diolivorans*, *L. brevis*, *L. hilgardii* та *L. parafarraginis* [27]. *L. buchneri* є чудовим інокулянтом для отримання якісного силосу з незначними втратами сухої речовини. Штами *L. buchneri* мають високу стійкість щодо впливу на них кислот (в т. ч. жовчних), а також є антагоністами щодо гнильної мікрофлори. Виявляють стійкість під час коливань температур у процесі зберігання корму та годівлі тварин [5]. Кілька досліджень виявили, що штам має дозозалежний вплив на якість силосу [28, 27]. Крім того, *L. hilgardii* зменшує кількість дріжджів і покращує аеробну стабільність силосу завдяки своїй здатності виробляти оцтову кислоту під час тривалого силосування [29]. Однак для гетероферментативних інокулянтів лактобактерій характерне утворення змішаної органічної кислоти [30, 31, 16].

4. Використання лактобактерій в виробництві.

Лактобактерії мають цікаву та довгу історію – це справжні „ветерани” на планеті Земля. Вони супроводжують людство тисячоліттями, відіграючи важливу роль у харчуванні та збереженні здоров'я. Лактобактерії – здавна

використовуються людством для створення різноманітних харчових продуктів. Їх здатність перетворювати цукри на молочну кислоту активно використовують у харчовій промисловості для виробництва кисломолочних продуктів, сирів, квашених овочів, сиров'ялених ковбас та інших ферментованих продуктів. Молочна кислота як продукт життєдіяльності лактобактерій посідає особливе місце в сучасному світі. Широке застосування у різних галузях обумовлено унікальними властивостями та корисними ефектами, які набувають дедалі більшого застосування в сільському господарстві. Її використання дає змогу підвищити врожайність, покращити якість продукції та зберегти здоров'я рослин і тварин. При цьому молочна кислота є екологічно чистим і безпечним засобом.

Водночас лактобактерії – перспективні кандидати для синтезу інших сполук, включаючи підсолоджувачі, вітаміни, бактеріоцини, екзополісахариди, лігноцелюлозні ферменти та ін. [32]. Ці сполуки відомі своїми різноманітними ролями, включаючи біоконсервацію та покращення поживних компонентів силосу. Це поліпшення годівлі розширює використання інокулянтів лактобактерій, які синтезують специфічні вітаміни у ферментованих продуктах. Лактобактерії використовують для синтезу метаболітів, L-аланін, діацетил, маніт, сорбіт, вітаміни та екзополісахариди. Ці метаболіти покращують поживний вміст, зменшують небезпечні хімічні речовини, подовжують термін зберігання та покращують смак ферментованих продуктів.

Вітаміни – це складні органічні молекули, необхідні в визначених кількостях як добавки та кормові добавки. Такі вітаміни як піридоксин, фолієва кислота, вітамін С і рибофлавін, синтезовані під час ферментації лактобактерій, покращують поживну цінність харчових продуктів. Наприклад, лактобактерії *L. plantarum*, *L. fermentum*, *L. acidophilus* і *L. Lactis*, що виробляють рибофлавін, підвищили поживний вміст ферментованих продуктів, що свідчить про їх потенціал покращувати поживну цінність харчових продуктів шляхом усунення потреби у збагаченні. Крім того, ці властивості можна досліджувати як альтернативу у вирішенні проблем аеробно нестабільного силосу з затхлим або пліснявим запахом і зниженою поживною цінністю через ріст пліснявих грибів та дріжджів [28]. Інокуляція *L. buchneri*, яка виробляє 1,2-пропандіол,

покращила аеробну стабільність кукурудзяного силосу та відіграла важливу роль у здоров'ї молочних корів шляхом боротьби з кетозом [33].

Однією з головних проблем під час зберігання силосу є його окиснення у разі контакту з повітрям. *L. buchneri* виробляє 1,2-пропандіол, який діє як консервант, знижуючи рН силосу та створюючи несприятливе середовище для розвитку небажаних мікроорганізмів. Це суттєво зменшує втрати поживних речовин і підвищує якість корму. Завдяки своїм консервувальним властивостям, *L. buchneri* мінімізує втрати сухої речовини під час зберігання силосу, що є особливо важливим для молочних корів, які потребують великої кількості поживних речовин. *L. buchneri* може сприяти збереженню більшої кількості легкозасвоюваних вуглеводів, білків і вітамінів у силосі, що позитивно впливає на продуктивність тварин.

Екзополісахариди продукують різні види молочнокислих бактерій, включаючи *S. thermophilus*, *L. reuteri*, *L. casei*, *L. plantarum* та ін., і використовуються як харчові добавки, зокрема у промисловості ферментованих харчових продуктів завдяки їх реологічним і текстурним властивостям. Молочнокислі бактерії, що виробляють екзополісахариди, отримали кращу конкурентну перевагу завдяки своїй здатності колонізувати поверхню у вигляді менших агрегатів. Оскільки розмір агрегатів зменшується, лактобактерії, що виробляють екзополісахариди, домінують у біоплівці, навіть за нижчих рівнів виробництва екзополісахаридів. Полісахариди, вироблені лактобактеріями, покращують текстурні та сенсорні властивості й подовжують термін зберігання продуктів рослинного походження, вони мають вирішальне значення для виробництва ферментованих харчових продуктів із рослин, таких як силос. Інокуляція силосу *P. pentosaceus*, що продукує екзополісахариди, показала високу антиоксидантну та антибактеріальну активність, головним чином шляхом поглинання вільних гідроксид-радикалів та повного пригнічення росту *Staphylococcus aureus* [34].

Крім того, бактеріоцини є антибактеріальними метаболітами білків, поліпептидів або білкових комплексів, що виробляють лактобактерії. Вони широко використовуються у виробництві силосу як біоконсерванти, що пригнічують ріст і розмноження патогенних мікроорганізмів [10].

Наприклад, інокуляція силосу з люцерни *L. delbrueckii*, що продукує бактеріоцини класу Па, зменшила кількість плісняви та дріжджів, підвищила якість бродіння силосу та значно покращила аеробну стабільність, ніж широко використовуваний інокулянт *L. plantarum* [24]. Відомо також, що деякі лактобактерії виробляють лігноцелюлітичні ферменти, включаючи оксидази та пероксидази, протеази, хітинази, маннаназу, амілази, пектинази, естерази, геміцелюлази та целюлази, які діють як біокатализатори під час розщеплення лігноцелюлози, компонента рослинної біомаси, на їхні складники [35]. Наприклад, лігноцелюлітичні ферменти, що секретують лактобактерії, включаючи *Enterococcus* sp. і *Paenibacillus* sp. нещодавно були виділені з морської трави для покращення силосованих кормів, які використовуються для годівлі тварин. Цікаво, що види молочнокислих бактерій були здатні розщеплювати олігосахариди та метаболізувати ксилітозу шляхом секреції ферментів, що розкладають геміцелюлозу, включаючи ксиланази/ендо-глюканази, естерази та арабінофуранозидазу [36]. Крім того, було виявлено, що штами *B. Coagulans* продукують розчинні термофільні целюлази за оптимальних умов росту (температура та рН), які сумісні з умовами роботи грибкових ферментів, які використовуються для деполімеризації лігноцелюлозної біомаси у зброджуванні цукру, покращують поживний склад та споживання силосу тваринами [37].

5. Активність лактобактерій під час виробництва силосу.

Раніше силосування було відоме для виробництва «солодкого» або «кислого» силосу [38]. Понад 90 % кормів, таких як кукурудза, сорго, трава, бобові та пшениця, вирощуються на місцевому рівні та переробляються як силос. Під час силосування високоякісний силос отримують завдяки фундаментальному біохімічному процесу, який включає спонтанну ферментацію за допомогою лактобактерій в анаеробних умовах, що, своєю чергою, дає змогу зберегти високу якість і поживну цінність кормових культур у процесі їх заготівлі і зберігання [4, 12].

Отже, лактобактерії використовують: 1) як антагоністи щодо мікроорганізмів, які спричиняють псування силосу; 2) та продукти їх життєдіяльності для зниження рН силосу та зменшення втрат сухої речовини [39]. Однак ключові біохімічні зміни для ефективної ферментації силосу за допомогою інокулянтів лактобактерій включають видалення кисню, бродіння, належну концентрацію, зниження рН, зниження буферної ємності, в'янення, адекватну температуру. Чотири ключові біохімічні зміни, які відбуваються під час процесу виробництва силосу, базуються на кількості зброджуваних цукрів, типів інокулянтів лактобактерій, здатності досягати та підтримувати низький рН в анаеробних умовах, а також кількості та видах вироблених органічних кислот і метаболітів (табл. 2).

Таблиця 2 – Стадії силосування з використанням інокулянтів

Стадія силосування	Проміжок часу	Основні процеси	Роль інокулянтів
Аеробна стадія	0–1 день	Інтенсивне дихання рослинних клітин, втрата сухої речовини, підвищення температури	Швидке зниження рН, пригнічення небажаних мікроорганізмів, зменшення втрат поживних речовин
Ферментаційна стадія	1–14 днів	Активне розмноження молочнокислих бактерій, перетворення цукрів на молочну кислоту, зниження рН	Прискорення ферментації, забезпечення швидкого зниження рН, формування кислого середовища, пригнічення розвитку небажаних мікроорганізмів
Стабільна стадія	14–60 днів і більше	Стабілізація рН, мінімальна мікробіологічна активність, збереження поживних речовин	Підтримання стабільного рН, запобігання розвитку небажаних мікроорганізмів, забезпечення збереження якості силосу
Стадія згодовування	60 днів і більше	Використання силосу тваринами	Забезпечення високої поживної цінності силосу, покращення здоров'я тварин

Аеробна стадія починається під час збору врожаю і триває до вичерпання запасів кисню, що відбувається незабаром після силосування. Рослинні цукри у свіжозрізаній рослинній біомасі розщеплюються на вуглекислий газ, воду та тепло за допомогою лактобактерій під час цієї стадії, а також утилізуються аеробними мікроорганізмами (дріжджами, пліснявою та аеробними бактеріями) на поверхні рослинної біомаси, які є значним джерелом дихання. Під час цієї початкової фази посилений ріст дріжджів і плісняви може зробити силос більш сприйнятливим до нагрівання та псування. Тому адекватна обробка силосу, яка включає інокуляцію лактобактерій, мінімізує активність патогенних мікроорганізмів [40]. Крім того, обробка рослинної біомаси комбінованими інокулянтами знижує активність дріжджів і плісняви, а також інших аеробних бактерій, які використовують молочну кислоту в достатній кількості, вироблену гомоферментативним лактобактеріями [27, 41].

Стадія анаеробної ферментації включає чергування різних бактерій, які зброджують рослинні цукру. Бродіння рослинної біомаси відбувається природним шляхом в анаеробних умовах, що пояснюється поширеністю бактерій на поверхні рослини. Однак частота та ефективність ферментації з погляду зниження рН залежать від кількості та видів лактобактерій, присутніх у рослинній біомасі, які можуть пригнічувати діяльність небажаних бактерій [42]. Одним із найбезпечніших методів збереження силосу є ферментація лактобактерій. Під час цієї стадії лактобактерії захищають корм від патогенних мікроорганізмів, виробляючи корисні органічні кислоти та протигрибкові агенти, такі як бактеріоцини. Крім того, гомоферментативні види лактобактерій є особливо активними у зниженні рН силосу, оскільки вони виробляють лише молочну кислоту, на відміну від гетероферментативних лактобактерій, які виробляють оцтову кислоту, яка сповільнює зниження рН під час цієї фази [43].

Внаслідок діяльності лактобактерій силосовані корми переходять у фазу зберігання, відому як стадія стабільності. За умови, що силос герметичний, на цій стадії відбувається незначна біологічна активність [44]. Силос, інокульований лактобактеріями, зберігається зі стабільним рН протягом цієї стадії, що зумовлює кислі умови, які обмежують активність і популяцію мікробів. Потенційно небезпечні види, такі як *Clostridia* і *Bacilli*, можуть жити у вигляді спор, доки силос за-

лишається герметичним. Крім того, декілька досліджень показали здатність лактобактерій підтримувати знижений рН силосу, корисні органічні кислоти та метаболіти, а також знижувати патогенну активність на цій стадії [22, 41].

Силос використовують якнайшвидше після відкриття силосної ями, щоб запобігти аеробному розкладанню. Коли кисень стає доступним до силосу, дріжджі метаболізують органічні кислоти, що виробляються лактобактеріями під час бродіння, підвищуючи рН і відновлюючи аеробну активність, що призводить до подальшого псування силосу. Тип і кількість органічних кислот та інших метаболітів, що виробляються лактобактеріями на стадії ферментації, впливають на аеробну стабільність силосу під час згодовування. Крім того, деякі органічні кислоти, такі як масляна, оцтова та пропіонова, що виробляються лактобактеріями під час бродіння, більш токсичні для дріжджів і цвілі, ніж молочна кислота, і, як наслідок, силос, вироблений найбільш ефективними гомоферментативним лактобактеріями, має нижчу аеробну стабільність, ніж ті, які інокульовані гетероферментативним лактобактеріями [44].

6. Продуктивність тварин та сучасна біотехнологія лактобактерій для покращення силосу. Одна з причин розгляду інокулянтів лактобактерій у виробництві та зберіганні силосу пов'язана з їх властивістю розщеплювати лігноцелюлози і тим самим підвищувати перетравність силосу тваринами. Лактобактерії широко використовуються у тваринництві, оскільки вони в результаті життєдіяльності здатні насичувати корм речовинами, які, своєю чергою, забезпечують повноцінність та передбачають споживання здорової їжі. Крім того, корм, насичений лактобактеріями та продуктами їх життєдіяльності, має кращу засвоюваність і стабілізує стан рубця. Наявність лактобактерій у силосі покращує ефективність годівлі тварин і продуктивність росту [24].

Лактобактерії ефективно працюють з пробіотичним потенціалом виживання в рубці, взаємодіють з іншими корисними мікроорганізмами та підтримують функціональність у тварин [45]. У нещодавніх дослідженнях було відмічено, що згодовування силосу, консервованого з використанням *L. Plantarum*, мало позитивний вплив на ефективність споживання корму та продуктивність тварин [46]. Заданими [43], силос, інокульований *L. plantarum* і *L. buchneri*, збільшив надої молока та зменшив вплив оксалатів на раціони

великої рогатої худоби, що сприяло підвищенню засвоюваності поживних речовин і покращенню продуктивності без негативного впливу на здоров'я тварин. Інокулянти лактобактерій, особливо гомоферментативні лактобактерії, пов'язані з покращенням засвоюваності поживних речовин і зменшенням вмісту антипоживних сполук. Наприклад, силос, оброблений *L. plantarum*, збільшив мікробну біомасу рубця під час дослідження *in vitro* [47].

Сучасні вимоги до якості силосу передбачають:

- підбір унікальних штамів лактобактерій для конкретних кормів;
- використання інокулянтів лактобактерій, ферменти яких здатні розкласти лігноцелюлозу;
- виробництво корисних органічних кислот та інших метаболітів, які пригнічують життєдіяльність небажаних та шкідливих мікроорганізмів під час зберігання і згодовування корму;

використання сучасних наукових методів, таких як метагеноміка, геноміка, протеоміка, метаболоміка, експресія генів і клонування вибраних штамів лактобактерій. Ці критерії було досліджено в науці про корми, за винятком останнього з обмеженою практичністю [27, 25, 31].

Тим не менш, біотехнологічний потенціал лактобактерій, задіяних у виробництві силосу, залишається недостатньо вивченим [9].

7. Тенденції та перспективи. Сьогодні існує кілька проблем і обмежень щодо застосування інокулянтів лактобактерій у виробництві та зберіганні силосу. По-перше, температура та вологість є найпоширенішими факторами, що впливають на якість силосу. Корисні ефекти інокулянтів лактобактерій для силосу, виробленого в холодному кліматі, сильно обмежені, оскільки низька атмосферна температура знижує біоактивність інокулянтів лактобактерій, знижуючи ступінь ферментації силосу [48, 49]. Більшість штамів лактобактерій придатні для ферментації сільськогосподарських культур або біомаси корму з відносно низькою вологістю, високим рівнем водорозчинних вуглеводів і низькою буферною здатністю, однак деякі корми, наприклад люцерна, біомаса якої характеризується високою вологістю та високою буферною здатністю, вимагають інокулянту лактобактерій, який може швидко ферментувати біомасу, знизити рН силосу за короткий час і пригнітити ріст патогенів. Крім того, інокулянт лактобактерій, що ви-

діляють лігноцелюлолітичні ферменти (целюлазу, ксиланазу, лакказу тощо), сприяє збільшенню вмісту водорозчинних вуглеводів у трав'яному силосі [50–51]. Таким чином, необхідно терміново розробити нові штамми лактобактерій з унікальними характеристиками ферментації. Розроблення унікальних штамів лактобактерій шляхом виділення із природних або джерел випадкового мутагенезу та лабораторної еволюції зазвичай є неефективною та займає багато часу. Тим не менш, техніка редагування геному дедалі більше привертає увагу та стає потужним інструментом для генетичного вдосконалення штамів лактобактерій завдяки своїй безпеці, простоті, ефективності тощо.

По-друге, силосні токсини є джерелом важких захворювань у людей і тварин, і рівень смертності вважається високим. Токсини силосування пов'язані з ростом і метаболізмом патогенних мікроорганізмів, таких як *Escherichia coli*, *B. cereus*, *Clostridium botulinum*, *L. monocytogenes*, а також дріжджів та пліснявих грибів під час силосування. Крім того, серйозне занепокоєння викликають токсини, присутні в тканинах рослин під час збору врожаю, які можуть вижити в процесі силосування [52]. Розвиток цих патогенів спричиняє неприйнятно підвищену швидкість більшості проявів псування, починаючи від зміни кольору, неприємного запаху, присмаку, слизу або будь-яких інших фізичних чи хімічних змін, які роблять силос неякісним. Тому розроблення лактобактерій-інокулянтів, які можуть змінювати ріст і розвиток цих патогенів під час силосування, є актуальною. Оскільки методи ферментації та фізичного зв'язування з клітинною стінкою бактерій є менш ефективними з обмеженим рівнем успіху, використання можливостей транскриптоміки, метаболоміки та генної інженерії може допомогти нам зрозуміти шляхи та механізми дії, а також покращити гени, відповідальні за виробництво корисних метаболітів у лактобактерій з потенціалом зміни росту патогенів під час силосування.

Нарешті, штамми лактобактерій з різними характеристиками бродіння мають вплив на якість силосу, а несприятливе бродіння силосу пов'язане з наявністю біогенних амінів, азотистих парів і надмірної кількості масляної кислоти. Існує зростаюча тенденція до розроблення комбінованих інокулянтів лактобактерій, сприятливий вплив яких на якість силосу зазвичай перевершує одноразові інокулянти. Хоча деякі інокулянти лактобактерій було задокументовано, знання

механізмів ферментації та регуляції різних штамів лактобактерій на силосі наразі дуже обмежені [44, 23].

Таким чином, інтегрований мультиомічний підхід шляхом об'єднання даних геноміки, метагеноміки та транскриптоміки для відстеження мікробної спільноти, експресії генів і білків, а також змін метаболітів лактобактерій має першочергове значення для надання вікна можливостей для розкриття механізмів фундаментальних взаємодій між видами лактобактерій під час виробництва та зберігання силосу та, ймовірно, спрямовує нас на розроблення ефективних комбінованих інокулянтів лактобактерій більш точними способами.

Висновки. Силосування є важливим мікробіологічним процесом, що забезпечує збереження кормових культур та ефективно використання кормових ресурсів. Якість силосу покращується завдяки додаванню різних інокулянтів лактобактерій, які ефективно працюють під час ферментації, зберігання та згодовування, покращуючи характеристики бродіння, сприяючи корисному мікробному різноманіттю та запобігаючи розвитку патогенних мікроорганізмів. Сучасні біотехнологічні підходи є потужними інструментами для виявлення, вдосконалення та розроблення високопродуктивних штамів лактобактерій, застосовуваних у виробництві силосу для зниження рН, покращення характеристик бродіння та аеробної стабільності, запобігання появі небажаних мікроорганізмів і підвищення продуктивності тварин для сталого розвитку сільського господарства.

REFERENCES

1. Bomko, V.S., Sivachenko, E.V., Smetanina, O.V. (2023). Feed and feed additives and the effectiveness of their use in animal feeding: a teaching aid. *Bila Tserkva*, 225 p. Available at: https://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/8420/1/Korm_dobavky.pdf. (in Ukrainian).
2. Ogurtsov, E.M., Bobro, M.A., Mikheev, V.G. *Fodder production and onion farming: a manual*; edited by E.M. Ogurtsov. Kharkiv: KhNAU, 512 p. (in Ukrainian).
3. Grant, R.J., Adesogan, A.T. (2018). Journal of dairy science silage special issue: introduction. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 3935–3936. DOI:10.3168/jds.2018-14630.
4. Fabiszewska, A.U., Zielińska, K.J., Wróbel, B. (2019). Trends in designing microbial silage quality by biotechnological methods using lactic acid bacteria inoculants: a minireview. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 35, pp. 1–8. DOI:10.1007/s11274-019-2649-2.
5. Romero, J.J., Zhao, Y., Balseca-Paredes, M.A., Tiezzi, F., Gutierrez-Rodriguez, E., Castillo, M.S. (2017). Laboratory silo type and inoculation effects on nutritional composition, fermentation, and bacterial and fungal communities of oat silage. *J. Dairy Sci.*, 100, pp. 1812–1828. DOI:10.3168/jds.2016-11642.
6. Mitioglo, L.V., Merzlov, S.V., Merzlova, G.V. (2023). Indicators of spoiled corn silage after its fermentation with different doses of biodestructor. *Scientific Progress & Innovations*. 26 (3), pp. 76–80. DOI:10.31210/spi2023.26.03.14. (in Ukrainian).
7. Okoye, C.O., Dong, K., Wang, Y., Gao, L., Li, X., Wu, Y., Jiang, J. (2022). Comparative genomics reveals the organic acid biosynthesis metabolic pathways among five lactic acid bacterial species isolated from fermented vegetables. *N. Biotechnol.*, 70, pp. 73–83. DOI:10.1016/j.nbt.2022.05.001.
8. Kravchenko, N.O., Dmitruk, O.M., Furs, N.M. (2021). The influence of probiotic bacteria on the direction and intensity of microbiological processes during ensiling of green corn mass. *Chernihiv*, pp. 58–66. DOI:10.35868/1997-3004.32.58-66. (in Ukrainian).
9. Amaral, R.C., Carvalho, B.F., Costa, D.M., Morenz, M.J.F., Schwan, R.F., da S. Ávila, C.L. (2020). Novel lactic acid bacteria strains enhance the conservation of elephant grass silage cv. BRS Capiçau Anim. Feed Sci. Technol., 264 p. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2020.114472.
10. Wang, D., Hwang, J.S., Dong Ho Kim, Lee S., Dae Hyuk Kim, Joe M.H. (2020). A newly isolated *Bacillus siamensis* SB1001 for mass production of poly- γ -glutamic acid. *Process Biochem.*, 92, pp. 164–173. DOI:10.1016/j.procbio.2019.11.034.
11. Horinouchi, T., Sakai, A., Kotani, H., Tanabe, K., Furusawa, C. (2017). Improvement of isopropanol tolerance of *Escherichia coli* using adaptive laboratory evolution and omics technologies. *J. Biotechnol.*, 255, pp. 47–56. DOI:10.1016/j.jbiotec.2017.06.408.
12. McAllister, A., Dunière, L., Drouin, P., Xu, S., Wang, Y., Munns, K., Zaheer, R. (2018). Silage review: Using molecular approaches to define the microbial ecology of silage. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 4060–4074. DOI:10.3168/jds.2017-13704
13. Wang, H., Hao, W., Ning, T., Zheng, M., Xu, C. (2018). Characterization of culturable yeast species associating with whole crop corn and total mixed ration silage. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 31, 198 p. DOI:10.5713/ajas.17.0183.
14. Xu, D., Ding, W., Ke, W., Li, F., Zhang, P., Guo, X. (2019). Modulation of metabolome and bacterial community in whole crop corn silage by inoculating homofermentative *Lactobacillus plantarum* and heterofermentative *Lactobacillus buchneri*. *Front. Microbiol.* 3299 p. DOI:10.3389/fmicb.2018.03299.
15. Kim, D., Lee, K.D., Choi, K.C., Kim, D., Lee, K.D., Choi, K.C. (2021). Role of LAB in silage fermentation: effect on nutritional quality and organic acid production – An overview AIMS Agric. Food. 1216 (6), pp. 216–234. DOI:10.3934/agrfood.2021014.
16. Soundharrajan, I., Park, H.S., Rengasamy, S., Sivanesan, R., Choi, K.C. (2021). Application and future prospective of lactic acid bacteria as natural addi-

- tives for silage production – a review. *Appl. Sci.* 11 p. DOI:10.3390/app11178127.
17. Ni, K., Wang, Y., Cai, Y., Pang, H. (2015). Natural lactic acid bacteria population and silage fermentation of whole-crop wheat Asian-Australas. *J. Anim. Sci.*, 28, 1123 p. DOI:10.5713/ajas.14.0955.
18. Drouin, P., Mari, L.J., Schmidt, J. (2020). Lactic acid bacteria as microbial silage additives: current status and future outlook. *New Adv. Ferment. Process.* 240 p. DOI:10.5772/intechopen.89326.
19. Carvalho, B.F., Sales, G.F.C., Schwan, R.F., Ávila, C.L.S. (2021). Criteria for lactic acid bacteria screening to enhance silage quality. *J. Appl. Microbiol.* 130, pp. 341–355. DOI:10.1111/jam.14833.
20. Kaewpila, C., Gunun, P., Kesorn, P., Subepang, S., Thip-uten, S., Cai, Y., Pholsen, S., Cherdthong, A., Khota, W. (2021). Improving ensiling characteristics by adding lactic acid bacteria modifies in vitro digestibility and methane production of forage-sorghum mixture silage. *Sci. Rep.* 11 (11), pp. 1–9. DOI:10.1038/s41598-021-81505-z.
21. Guan, H., Shuai, Y., Ran, Q., Yan, Y., Wang, X., Li, D., Cai, Y., Zhang, X. (2020). The microbiome and metabolome of Napier grass silages prepared with screened lactic acid bacteria during ensiling and aerobic exposure. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 269, 114673 p. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2020.114673.
22. Bai, J., Ding, Z., Ke, W., Xu, D., Wang, M., Huang, W., Zhang, Y., Liu, F., Guo, X. (2021). Different lactic acid bacteria and their combinations regulated the fermentation process of ensiled alfalfa: ensiling characteristics, dynamics of bacterial community and their functional shifts. *Microb. Biotechnol.* 14, 1171 p. DOI:10.1111/1751-7915.13785.
23. Xu, Z., He, H., Zhang, S., Kong, J. (2017). Effects of inoculants *Lactobacillus brevis* and *Lactobacillus parafarraginis* on the fermentation characteristics and microbial communities of corn stover silage. *Sci. Rep.* 7 p. DOI:10.1038/s41598-017-14052-1.
24. Zhang, Y.C., Wang, X.K., Li, D.X., Lin, Y.L., Yang, F.Y., Ni, K.K. (2019). Impact of wilting and additives on fermentation quality and carbohydrate composition of mulberry silage. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 33, pp. 254–263. DOI:10.5713/AJAS.18.0925.
25. Nascimento, Agarussi M.C., Gomes, Pereira O., de Paula, R.A., Silva, V.P., Santos, Roseira J.P., Fonseca, e Silva F. (2019). Novel lactic acid bacteria strains as inoculants on alfalfa silage fermentation. *Sci. Rep.* 9 (9), pp. 1–9. DOI:10.1038/s41598-019-44520-9.
26. Jiang, S., Cai, L., Lv, L., Li, L. (2021). *Pediococcus pentosaceus*, a future additive or probiotic candidate. *Microb. Cell Factor.* 20 (20), pp. 1–14. DOI:10.1186/s12934-021-01537-Y.
27. Muck, R.E., Nadeau, E.M.G., McAllister, T.A., Contreras-Govea, F.E., Santos, M.C., Kung, L. (2018). Silage revieshh: Recent advances and future uses of silage additives. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 3980–4000. DOI:10.3168/JDS.2017-13839.
28. Kung, Jr.L., Shaver, R.D., Grant, R.J., Schmidt, R.J. (2018). Silage revieshh: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 4020–4033. DOI:10.3168/jds.2017-13909.
29. Ferrero, F., Tabacco, E., Borreani, G. (2021). *Lentilactobacillus hilgardii* Inoculum, Dry matter contents at harvest and length of conservation affect fermentation characteristics and aerobic stability of corn silage. *Front. Microbiol.* 12, 1333 p. DOI:10.3389/FMICB.2021.675563/BIBTEH.
30. Ning, T., Shhang, H., Zheng, M., Niu, D., Zuo, S., Hu, C. (2017). Effects of microbial enzymes on starch and hemicellulose degradation in total mixed ration silages. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 30, pp. 171–180. DOI:10.5713/ajas.16.0046.
31. Puntillo, M., Gaggiotti, M., Oteiza, J.M., Binetti, A., Massera, A., Vinderola, G. (2020). Potential of lactic acid bacteria isolated from different forages as silage inoculants for improving fermentation quality and aerobic stability. *Front. Microbiol.* 11 p. DOI:10.3389/FMICB.2020.586716.
32. Tarraran, L., Mazzoli, R. (2018). Alternative strategies for lignocellulose fermentation through lactic acid bacteria: the state of the art and perspectives. *FEMS Microbiol. Lett.* 365, 126 p. DOI:10.1093/FEMSLE/FNY126.
33. Huang, Z., Shhang, M., Ke, Shh., Guo, H. (2021). Screening of high 1,2-propanediol production by *Lactobacillus buchneri* strains and their effects on fermentation characteristics and aerobic stability of shhhole-plant corn silage. *Agric.* 11, pp. 11–12. DOI:10.3390/agriculture11070590.
34. Fan, Y., Li, H., Tian, R., Tang, R., Zhang, J. (2022). Characterization and biological activity of a novel ehopolysaccharide produced by *Pediococcus pentosaceus* SSC-12 from silage. *Microorganisms.* 10 p. DOI:10.3390/microorganisms10010018.
35. Chukshhuma, O.B., Rafatullah, M., Tajarudin, H.A., Ismail, N. (2020). Ignocellulolytic enzymes in biotechnological and industrial processes: a revieshh. *Sustain.* 12, pp. 1–31. DOI:10.3390/su12187282.
36. Díaz-García, L., Chaparro, D., Jiménez, H., Gómez-Ramírez, L.F., Bernal, A.J., Burbano-Erazo, E., Jiménez, D.J. (2021). Top-doshhn enrichment strategy to co-cultivate lactic acid and lignocellulolytic bacteria from the megathyrus mahimus phyllosphere. *Front. Microbiol.* 12, 3345 p. DOI:10.3389/FMICB.2021.744075/BIBTEH.
37. Aulitto, M., Fusco, S., Bartolucci, S., Franzén, C.J., Contursi, P. (2017). *Bacillus coagulans* MA-13: a promising thermophilic and cellulolytic strain for the production of lactic acid from lignocellulosic hydrolysate. *Biotechnol. Biofuels.* 10, pp. 1–15. DOI:10.1186/s13068-017-0896-8/TABLES/2.
38. Bernardes, T.F., Daniel, J.L.P., Adesogan, A.T., McAllister, T.A., Drouin, P., Nussio, L.G., Huhtanen, P., Tremblay, G.F., Bélanger, G., Cai, Y. (2018). Silage revieshh: Unijau challenges of silages made in hot and cold regions. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 4001–4019. DOI:10.3168/jds.2017-13703.

39. Ren, H., Sun, Shhang, L., Zhao, J.Ja., Sun, J., Li, J., Zhang, B. (2021). Enhancing the Co-ensiling performance of corn stover and cabbage shhaste via the addition of cellulase. *Bioresources*. 16, pp. 6342–6362. DOI:10.15376/biores.16.3.6342-6362.
40. Pretz, J. (2020). Understanding the process of corn silage fermentation and starch availability. *Hubbard Feed*. pp. 1–2. Available at: <https://www.hubbarfeeds.com/blog/under-standing-process-corn-silage-fermentation-and-starch-availability> (accessed 23.03.25).
41. Nazar, M., Wang, S., Zhao, J., Dong, Z., Li, J., Kaka, N.A., Shao, T. (2020). The feasibility and effects of exogenous epiphytic microbiota on the fermentation quality and microbial community dynamics of whole crop corn. *Bioresour. Technol.*, 306, pp. 1–10. DOI:10.1016/j.biortech.2020.123106.
42. Xia, Li D., Kui, Ni K., Chao, Zhang Y., li, Lin Y., Yu, Yang F. (2018). Influence of lactic acid bacteria, cellulase, cellulase-producing *Bacillus pumilus* and their combinations on alfalfa silage quality. *J. Integr. Agric.*, 17, pp. 2768–2782, DOI:10.1016/S2095-3119(18)62060-X.
43. Oliveira, E.R., Takiya, C.S., Del, Valle T.A., Rennó, F.P., Goes, R.H.T.B., Leite, R.S.R., Oliveira, K.M.P., Batista, J.D.O., Araki, H.M.C., Damiani, J., Da Silva, M.S.J., Gandra, E.R.S., Pereira, T.L., Gandra, J.R. (2019). Effects of exogenous amylolytic enzymes on fermentation, nutritive value, and in vivo digestibility of rehydrated corn silage. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 251, pp. 86–95. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2019.03.001.
44. Borreani, G., Tabacco, E., Schmidt, R.J., Holmes, B.J., Muck, R.E. (2018). Silage review: factors affecting dry matter and quality losses in silages. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 3952–3979. DOI:10.3168/JDS.2017-13837.
45. Matthews, C., Crispie, F., Lewis, E., Reid, M., O'Toole, P.W., Cotter, P.D. (2019). The rumen microbiome: a crucial consideration when optimising milk and meat production and nitrogen utilisation efficiency. *Gut Microbes*. 10, 115 p. DOI:10.1080/19490976.2018.1505176.
46. Queiroz, O.C.M., Ogunade, I.M., Weinberg, Z., Adesogan, A.T. (2018). Silage review: food-borne pathogens in silage and their mitigation by silage additives. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 4132–4142. DOI:10.3168/jds.2017-13901
47. Monteiro, H.F., Paula, E.M., Muck, R.E., Broderick, G.A., Faciola, A.P. (2021). Effects of lactic acid bacteria in a silage inoculant on ruminal nutrient digestibility, nitrogen metabolism, and lactation performance of high-producing dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 104, pp. 8826–8834. DOI: 10.3168/JDS.2021-20155.
48. Campbell, M., Ortuño, J., Ford, L., Davies, D.R., Koidis, A., Walsh, P.J., Theodoridou, K. (2020). The effect of ensiling on the nutritional composition and fermentation characteristics of brown seaweeds as a ruminant feed ingredient. *Anim. Open Access J. MDPI*, 10, pp. 1–17. DOI:10.3390/ANI10061019.
49. Mejía-Avellaneda, L.F., Suárez, H., Jiménez, H., Mesa, L. (2021). Challenges and opportunities for the production of lactic acid bacteria inoculants aimed for ensiling processes. *Critical Reviews in Biotechnology*. 42 (7), pp. 1028–1044. DOI:10.1080/07388551.2021.1988508.
50. Guo, X.S., Ke, W.C., Ding, W.R., Ding, L.M., Xu, D.M., Wang, W.W., Zhang, P., Yang, F.Y. (2018). Profiling of metabolome and bacterial community dynamics in ensiled *Medicago sativa* inoculated without or with *Lactobacillus plantarum* or *Lactobacillus buchneri*. *Sci. Rep.* 8, pp. 1–10. DOI:10.1038/s41598-017-18348-0.
51. Hu, Z., Niu, H., Tong, Q., Chang, J., Yu, J., Li, S., Zhang, S., Ma, D. (2020). The microbiota dynamics of alfalfa silage during ensiling and after air exposure, and the metabolomics after air exposure are affected by *Lactobacillus casei* and cellulase addition. *Front. Microbiol.* 11, 2888 p. DOI:10.3389/FMICB.2020.519121/BIBTEX.
52. Driehuis, F., Wilkinson, J.M., Jiang, Y., Ogunade, I., Adesogan, A.T. (2018). Silage review: animal and human health risks from silage. *J. Dairy Sci.*, 101, pp. 4093–4110. DOI:10.3168/jds.2017-13836.

Modern biotechnology in ensiling

Chernyuk S., Kryzhak M.

The article analyses the work of Ukrainian and foreign scientists who devote significant attention to researching and improving silage technologies. Their scientific work covers a wide range of issues, from the selection of plant crops to the development of new preservation methods. The microbiological process used to preserve the quality of fresh feed on livestock farms has been studied. The biochemical and microbiological changes that occur during silage production have prompted the search for new silage additives, highlighting the potential of certain microbial strains that are more effective at biopreservation. Lactic acid bacteria are widely known for their diverse applications as additives in the fermentation of agricultural crops or forage biomass during silage production. However, the recent inconsistency in silage quality can be explained by the lack of information on gene expression and molecular mechanisms of the microbiota involved in silage production. Current research focuses on deciphering nutrient-rich animal feeds with improved *Lactobacillus* inoculants. Modern biotechnological tools, such as metagenomics, genomics, and proteomics, allow the identification, improvement, and development of highly productive *Lactobacillus* strains for use in silage. These strains help lower pH, improve fermentation characteristics, and enhance the aerobic stability of silage, ensuring

its high quality and contributing to sustainable agricultural development. Therefore, the main purpose of silage is to preserve the nutritional properties of fresh feed. The introduction of specific bacterial cultures (inoculants) will significantly improve silage quality by accelerating fermentation, creating a favourable environment for beneficial microorganisms, and suppressing the growth of harmful ones. Thus, this

review article explores the role of lactobacillus inoculants in silage production, as well as modern biotechnological approaches that are powerful tools for identifying, improving, and developing highly productive lactobacillus strains.

Keywords: silage, lactobacilli, inoculant strains, fermentation, biological additives, nutritional value.



Copyright: Чернюк С.В., Крижак М.С. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Чернюк С.В.

Крижак М.С.

<https://orcid.org/0000-0003-0488-3624>

<https://orcid.org/0009-0007-6910-2207>