



**KAPITEL 12 / CHAPTER 12 <sup>12</sup>**  
**INNOVATIVE BIOTECHNOLOGIES IN THE SILAGE-MAKING PROCESS**  
**DOI: 10.30890/2709-2313.2025-45-02-033**

## **Вступ**

Силосування є мікробіологічним методом консервування свіжих кормів шляхом їх перетворення на силос, який широко застосовується у фермерських господарствах для годівлі сільськогосподарських тварин. Сировиною для отримання силосу слугують рослинні рештки, фуражна біомаса, а також інші сільськогосподарські чи промислові побічні продукти, що зберігаються в анаеробних умовах із використанням природного або контрольованого підкислення. Такий корм особливо важливий у періоди нестачі свіжої зеленої маси [1, 2].

Процес виробництва силосу ґрунтується на ферментації рослинної біомаси з вмістом вологи, як правило, понад 50 %. Завдяки здатності мінімізувати втрати поживних речовин під час заготівлі та зберігання, а також забезпечувати більш ефективну й своєчасну переробку порівняно з сухими кормами, силосування залишається одним із ключових методів консервування кормів, зокрема на молочних фермах [3]. Фуражна біомаса або сільськогосподарські культури зберігаються у вигляді силосу як альтернатива свіжим кормам або в умовах їх дефіциту, зумовленого уповільненням росту пасовищ чи несприятливими кліматичними умовами [4, 5].

Силосування є базовим біологічним процесом, що відбувається в результаті спонтанної ферментації в анаеробному середовищі після збирання кормових культур на оптимальній стадії стиглості. Технологічний процес включає подрібнення рослинної маси, її закладання в силососховища, ущільнення для витіснення повітря, подальше зберігання та згодовування тваринам. Якість силосу значною мірою визначається сукупністю біологічних і технологічних чинників, зокрема активністю молочнокислих бактерій, які забезпечують

---

<sup>12</sup>*Authors: Chernyuk Sergey Vasilyevich, Kryzhak Maxim Serhiiovych*  
*Author's sheets: 1,00*



утворення молочної та інших органічних кислот, зниження рН та пригнічення розвитку мікроорганізмів, відповідальних за псування корму [6].

Молочнокислі бактерії є основними мікроорганізмами, що використовуються для збереження якості силосованих кормів. До родів, представники яких найчастіше застосовуються як інокулянти під час силосування, належать *Enterococcus*, *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, *Weissella* та *Bacillus* [7, 8].

На сучасному етапі розвитку сталого сільського господарства використання культур молочнокислих бактерій набуває особливої актуальності з огляду на їх потенціал щодо покращення здоров'я людини й тварин [9]. Консервація силосу з використанням бактеріальних інокулянтів вважається ефективним і технологічно зручним способом зберігання свіжих кормів у тваринництві. Водночас варіабельність якості силосу, що спостерігається останніми роками, частково пояснюється недостатнім розумінням генетичних і молекулярних механізмів функціонування мікробіоти, задіяної у процесі силосування [10].

Застосування сучасних біотехнологічних підходів, зокрема технологій секвенування нового покоління (NGS), дало змогу ідентифікувати низку перспективних мутантів, деякі з яких були успішно інтегровані у корисні мікроорганізми для підвищення якості силосу. Подальший розвиток метагеномного секвенування мікробної ДНК у силосі з використанням різних молекулярних методів суттєво розширив уявлення про мікробну різноманітність і складність процесів, що відбуваються під час силосування. Ці підходи дозволили детальніше охарактеризувати роль популяцій лактобактерій та показати, яким чином бактеріальні інокулянти можуть формувати мікробіоми, сприятливі для отримання високоякісного силосу [11].

Крім того, шляхом удосконалення штамів стало можливим створення високоефективних мікроорганізмів для виробництва та збереження силосу. Такі підходи зарекомендували себе як потужні інструменти для характеристики й конструювання нових штамів лактобактерій із заданими функціональними властивостями [13–15]. У зв'язку з цим метою даної роботи є узагальнення



сучасних даних щодо ролі культур лактобактерій у процесах виробництва та збереження силосу, аналіз новітніх підходів до їх удосконалення, а також окреслення перспектив розвитку технологій силосування в контексті сталого сільського господарства.

## **12.1 Біохімічні механізми та технологічні особливості силосування**

Поглиблене розуміння біохімічних змін, що відбуваються під час силосування, зокрема динаміки кислотності, трансформації вуглеводів та формування профілю органічних кислот, стало основою для розробки ефективніших силосних добавок і добору спеціалізованих штамів мікроорганізмів [14]. Ключовим біохімічним показником якості силосу є швидке зниження рН середовища, що забезпечує стабілізацію корму та пригнічення розвитку небажаної мікрофлори, включно з ентеробактеріями, клостридіями та пліснявими грибами.

На початкових етапах силосування рослинні ферменти та епіфітна мікрофлора ініціюють гідроліз структурних і запасних вуглеводів до простих цукрів, які слугують субстратом для молочнокислого бродіння. У разі домінування гомоферментативних молочнокислих бактерій основним продуктом метаболізму є молочна кислота, накопичення якої забезпечує інтенсивне зниження рН до значень 3,8 – 4,2. Такий рівень кислотності вважається оптимальним для збереження поживних речовин і пригнічення протеолітичних та маслянокислих процесів.

За участі гетероферментативних лактобактерій формується більш складний профіль органічних кислот, який, окрім молочної кислоти, включає оцтову кислоту, етанол і вуглекислий газ. Хоча цей шлях супроводжується дещо більшими втратами сухої речовини, підвищений вміст оцтової кислоти сприяє покращенню аеробної стабільності силосу за рахунок інгібування дріжджів і пліснявих грибів. Таким чином, співвідношення гомо- та гетероферментативних шляхів ферментації визначає баланс між швидкістю підкислення, збереженням



енергії та стійкістю силосу до вторинного псування.

Силосні добавки, як хімічні, так і біологічні, відіграють важливу роль у регуляції біохімічних процесів. Хімічні добавки, зокрема органічні кислоти та їх солі (сорбінова, мурашина, пропіонова, оцтова, бензойна), безпосередньо впливають на зниження рН і пригнічення активності небажаних мікроорганізмів, обмежуючи ферментативний розпад білків і утворення аміаку. Водночас біологічні добавки — культури молочнокислих бактерій та ферментні препарати (целюлази, геміцелюлази) — сприяють спрямованій ферментації шляхом підвищення доступності субстратів і селективної активації бажаних метаболічних шляхів.

Ферментні добавки підсилюють гідроліз клітинних стінок рослин, збільшуючи вміст водорозчинних вуглеводів і, відповідно, інтенсивність молочнокислого бродіння. У результаті формується сприятливіший профіль органічних кислот із переважанням молочної кислоти та контрольованим утворенням оцтової кислоти, що забезпечує як ефективне підкислення, так і достатню аеробну стабільність корму. Важливим біохімічним наслідком є також зниження інтенсивності протеолізу, зменшення накопичення небілкового азоту та збереження амінокислотного складу силосу.

Концентрація та видовий склад молочнокислих бактерій у силосі характеризуються значною варіабельністю, що зумовлює вирішальну роль правильного добору та застосування бактеріальних інокулянтів у формуванні високоякісного силосу [18]. Ефективність силосування значною мірою залежить від відповідності властивостей інокулянту конкретним умовам ферментації, типу рослинної сировини та технологічним параметрам заготівлі кормів.

Перед вибором інокулянтів молочнокислих бактерій для силосування враховують низку біологічних і технологічних чинників. Відібрані штами, як правило, ізолюють із природного рослинного середовища, після чого проводять багатоступеневий скринінг. Він включає оцінку здатності до утворення органічних кислот, інтенсивності та спрямованості білкового розщеплення, швидкості росту за різних значень рН і температури, а також перевірку



ефективності у модельних або виробничих умовах силосування.

Додатковими критеріями добору інокулянтів є екологічна адаптованість до рослинної біомаси, здатність до швидкої колонізації зрізаної або подрібненої сировини, стійкість до дії бактеріофагів, сумісність із багатокомпонентними бактеріальними культурами, генетична стабільність і толерантність до стресових факторів, зокрема осмотичного тиску та низьких значень рН. Важливою характеристикою також є здатність штамів інгібувати ріст цвілевих грибів і дріжджів, що безпосередньо впливає на аеробну стабільність силосу [19, 20].

Не менш значущими є умови середовища силосування та здатність лактобактерій швидко адаптуватися до анаеробних умов і ефективно метаболізувати доступні поживні субстрати. Саме швидкість переходу до активного молочнокислого бродіння визначає інтенсивність зниження рН та стабільність процесу ферментації рослинної біомаси [9, 19, 21].

З урахуванням особливостей природної ферментації кормових культур у практиці силосування переважно застосовують дві функціональні групи інокулянтів молочнокислих бактерій — гомоферментативні та гетероферментативні, кожна з яких виконує специфічну роль у формуванні біохімічного профілю силосу.

Ефективність застосування інокулянтів молочнокислих бактерій у силосуванні значною мірою визначається комплексним підходом до відбору штамів, який ґрунтується на біохімічних, генетичних і технологічних характеристиках мікроорганізмів. Врахування цих критеріїв дозволяє забезпечити керований перебіг ферментації, формування оптимального профілю органічних кислот і стабільну якість силосу за різних умов заготівлі та зберігання кормів.

З біохімічної точки зору ключовими показниками є здатність штамів швидко метаболізувати водорозчинні вуглеводи з утворенням молочної кислоти, інтенсивність зниження рН, обмеження протеолітичних процесів і мінімізація накопичення аміачного азоту. Важливе значення має також спрямованість ферментації: гомоферментативні штами забезпечують швидке підкислення



середовища, тоді як гетероферментативні сприяють формуванню оцтової кислоти, що підвищує аеробну стабільність силосу.

Генетичні характеристики інокулянтів визначають стабільність їх функціональних властивостей у процесі промислового використання. Генетично стабільні штами з передбачуваним метаболічним профілем, відсутністю мобільних елементів, пов'язаних із патогенністю або антибіотикорезистентністю, є найбільш придатними для застосування в кормовиробництві. Крім того, стійкість до бактеріофагів та збереження експресії ключових ферментативних генів у різних умовах силосування мають критичне значення для надійності інокулянтів.

**Таблиця 1 – Основні критерії відбору штамів молочнокислих бактерій для силосування**

Група критеріїв	Показник	Значення для процесу силосування
Біохімічні	Швидкість утворення молочної кислоти	Інтенсивне зниження рН і стабілізація силосу
	Профіль органічних кислот	Оптимальне співвідношення молочної та оцтової кислот
	Протеолітична активність	Обмеження втрат білка та $\text{NH}_3\text{-N}$
	Використання вуглеводів	Ефективне споживання цукрів рослинної біомаси
Генетичні	Генетична стабільність	Збереження властивостей під час масового виробництва
	Відсутність патогенних генів	Безпечність для тварин і людини
	Стійкість до бактеріофагів	Надійність ферментації
	Регуляція ферментативних генів	Передбачуваний метаболізм
Технологічні	Адаптація до анаеробіозу	Швидкий початок ферментації
	Температурна толерантність	Стабільна дія за різних умов заготівлі
	Сумісність із добавками	Можливість комбінованого застосування
	Інгібування дріжджів і цвілі	Підвищення аеробної стабільності

З технологічного погляду важливими є швидка адаптація бактерій до анаеробного середовища, толерантність до коливань температури й осмотичного тиску, сумісність із ферментними добавками та іншими бактеріальними культурами, а також здатність ефективно колонізувати рослинну біомасу одразу



після подрібнення. Саме поєднання біохімічної активності, генетичної стабільності та технологічної надійності визначає доцільність включення певного штаму до складу комерційних інокулянтів.

У практиці кормовиробництва застосовуються комерційні інокулянти, що містять один або декілька штамів молочнокислих бактерій, підібраних відповідно до типу сировини та бажаного ефекту. Такі препарати зазвичай класифікують за функціональним призначенням, а не за торговельною назвою.

**Таблиця 2 - Узагальнені типи комерційних інокулянтів для силосування та їх функціональне призначення**

Тип інокулянту	Основний склад	Функціональна роль
Гомоферментативні	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Pediococcus spp.</i>	Швидке зниження рН, мінімальні втрати сухої речовини
Гетероферментативні	<i>Lactobacillus buchneri</i> , <i>L. brevis</i>	Підвищення аеробної стабільності, інгібування дріжджів
Комбіновані	Гомо- + гетероферментативні штами	Баланс між стабілізацією та стійкістю до псування
З ферментами	Лактобактерії + целюлази/геміцелюлази	Підвищення доступності цукрів і якості ферментації
Спеціалізовані	Штами з антимікотичною активністю	Контроль пліснявих грибів і мікотоксинів

Таким чином, сучасні комерційні інокулянти є результатом цілеспрямованого відбору штамів молочнокислих бактерій за сукупністю біохімічних, генетичних і технологічних критеріїв. Використання таких препаратів дозволяє не лише оптимізувати перебіг силосування, але й формувати стабільний біохімічний профіль силосу з високою кормовою цінністю та прогнозованими показниками безпеки.

## **12.2 Гомоферментативні молочнокислі бактерії як чинник ефективного силосування**

Гомоферментативні лактобактерії є одними з найстаріших і найпоширеніших інокулянтів, що застосовуються у виробництві силосу [4]. До



цієї групи належать представники родів *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus* та *Lactobacillus*, які відзначаються здатністю продукувати високі концентрації молочної кислоти під час бродіння [15]. Завдяки цьому вони забезпечують швидке зниження рН силосу, пригнічують ріст патогенних мікроорганізмів і сприяють збереженню білків рослинної сировини, що є критично важливим для підтримки кормової цінності [22, 23].

**Таблиця 3 – Основні гомоферментативні лактобактерії, що застосовуються у виробництві силосу**

Вид / рід	Основні біохімічні властивості	Вплив на якість силосу	Особливості застосування
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Інтенсивне утворення молочної кислоти, швидке зниження рН	Зменшення втрат сухої речовини, пригнічення патогенів	Універсальний інокулянт для злакових і бобових культур
<i>Pediococcus pentosaceus</i>	Висока швидкість росту, ефективна ферментація цукрів	Покращення перетравності сухої речовини	Доцільний для кормів із високим вмістом вуглеводів
<i>Pediococcus acidilactici</i>	Толерантність до низького рН і підвищених температур	Стабілізація ферментації за стресових умов	Використовується в комбінованих інокулянтах
<i>Enterococcus faecium</i>	Швидкий старт ферментації	Раннє підкислення маси	Ефективний на початкових етапах силосування
<i>Streptococcus spp.</i>	Активне споживання простих цукрів	Прискорене зниження рН	Застосовується рідше, переважно у сумішах

Особливо ефективними гомоферментативні інокулянти вважаються для силосу з бобових культур, оскільки висока продукція молочної кислоти мінімізує втрати сухої речовини та сприяє кращій стабілізації корму. Серед найбільш поширених видів у практиці силосування виділяють *Lactobacillus plantarum*, який завдяки своїй стійкості до кислого середовища, жовчних солей та антагоністичній активності проти патогенних мікроорганізмів, забезпечує стабільне молочнокисле бродіння та високу якість силосу.

Водночас інокуляція силосу *Pediococcus pentosaceus* продемонструвала покращення перетравності сухої речовини порівняно з *L. plantarum*, що може



бути важливим для оптимізації продуктивності тварин. Багато штамів *Pediococcus* також розглядаються як перспективні пробіотики завдяки їх антиоксидантним, протизапальним, детоксикаційним і гіполіпідемічним властивостям [25].

Крім того, численні дослідження показують, що використання інокулянтів із переважанням гомоферментативних лактобактерій підвищує продуктивність тварин на 3–5 %, що пояснюється мінімальною продукцією етанолу, оцтової та масляної кислот, а також зменшенням втрат сухої речовини на 2–3 % порівняно з інокуляцією гетероферментативними лактобактеріями [25]. Біохімічно це обумовлено тим, що гомоферментативні штами концентрують метаболізм на утворенні молочної кислоти, що сприяє швидкому підкисленню середовища та пригніченню протеолітичних та маслянокислих процесів, які призводять до втрат поживних речовин.

Важливо також зазначити, що гомоферментативні інокулянти сприяють формуванню більш передбачуваного профілю органічних кислот у силосі, що є ключовим фактором не лише для збереження кормової цінності, а й для підтримки оптимальної мікробіологічної стабільності під час згодовування тваринам. Завдяки цим властивостям вони залишаються основою сучасних технологій силосування та використовуються як у чистих, так і в комбінованих бактеріальних препаратах для різних типів кормової сировини.

### 12.3 Гетероферментативні інокулянти: значення для аеробної стабільності силосу

Гетероферментативні молочнокислі бактерії представлені переважно родами *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Weissella* та *Lactobacillus* і відіграють важливу роль у формуванні аеробної стабільності силосу. На відміну від гомоферментативних лактобактерій, вони здатні перетворювати гексози не лише на молочну кислоту, а й на низку інших метаболітів, зокрема оцтову кислоту, етанол і вуглекислий газ. Крім того, для окремих видів характерна вторинна



ферментація, під час якої молочна кислота використовується як субстрат для утворення оцтової кислоти, що суттєво впливає на стабільність силосу за умов доступу кисню.

Серед гетероферментативних лактобактерій найбільш дослідженим і практично значущим є *Lactobacillus buchneri*, тоді як інші види, зокрема *L. kefir*, *L. diolivorans*, *L. brevis*, *L. hilgardii* та *L. parafarraginis*, залишаються менш вивченими щодо їх ролі у силосуванні [24]. Штами *L. buchneri* відзначаються високою кислотостійкістю, включаючи толерантність до органічних і жовчних кислот, антагоністичною активністю проти гнильної мікрофлори та здатністю зберігати метаболічну активність за коливань температури під час зберігання і згодовування кормів [5]. Дослідження свідчать про дозозалежний характер впливу цього виду на біохімічні показники силосу, зокрема вміст оцтової кислоти та рівень аеробної стабільності [25].

**Таблиця 4 – Основні гетероферментативні лактобактерії, що застосовуються у силосуванні**

Вид / рід	Основні продукти ферментації	Біохімічна роль у силосі	Технологічний ефект
<i>Lactobacillus buchneri</i>	Оцтова кислота, CO <sub>2</sub>	Перетворення молочної кислоти, пригнічення дріжджів	Висока аеробна стабільність, менші втрати ДМ
<i>Lactobacillus hilgardii</i>	Оцтова кислота	Інгібування дріжджів на пізніх етапах	Подовження стабільності при згодовуванні
<i>Lactobacillus brevis</i>	Молочна, оцтова кислоти, етанол	Формування змішаного кислотного профілю	Помірне покращення стабільності
<i>Lactobacillus kefir</i>	Молочна й оцтова кислоти	Рання адаптація до анаеробних умов	Підтримка початкової ферментації
<i>Leuconostoc spp.</i>	Молочна кислота, CO <sub>2</sub>	Ініціація ферментації	Швидкий старт бродіння
<i>Weissella spp.</i>	Молочна та оцтова кислоти	Стабілізація мікробіоценозу	Допоміжний ефект у сумішах

Крім того, *Lactobacillus hilgardii* проявляє здатність істотно знижувати чисельність дріжджів і покращувати аеробну стабільність силосу, особливо на пізніх етапах зберігання, завдяки інтенсивному синтезу оцтової кислоти [29].



Загалом для гетероферментативних інокулянтів характерне формування змішаного профілю органічних кислот, що включає молочну, оцтову та інші кислоти, а також супутні метаболіти, які комплексно впливають на мікробіологічну стійкість і якість силосу [22-23].

Таким чином, гетероферментативні лактобактерії характеризуються функціональною різноманітністю та відіграють ключову роль у формуванні аеробної стабільності силосу. Представлені в таблиці дані свідчать, що різні види цієї групи відрізняються як за біохімічними шляхами ферментації, так і за технологічним ефектом у процесі зберігання та згодовування корму. Здатність до синтезу оцтової кислоти, зокрема шляхом вторинного метаболізму молочної кислоти, є визначальним чинником інгібування дріжджів і пліснявих грибів та зниження інтенсивності аеробного псування.

Водночас застосування гетероферментативних інокулянтів потребує зваженого підходу, оскільки надмірне утворення побічних продуктів ферментації може супроводжуватися підвищеними втратами енергії та сухої речовини. У зв'язку з цим найбільш доцільним вважається використання селекціонованих штамів або комбінованих інокулянтів, у яких поєднуються швидке підкислення середовища та підвищена аеробна стабільність силосу.

Отже, гетероферментативні лактобактерії є важливим інструментом оптимізації якості силосу, особливо в умовах високого ризику аеробного псування під час зберігання та згодовування. Їх раціональне застосування, з урахуванням типу кормової сировини та технологічних умов, дозволяє суттєво підвищити стабільність і безпечність силосованих кормів, що робить цю групу мікроорганізмів невід'ємною складовою сучасних технологій силосування.

#### **12.4 Застосування лактобактерій у виробничих технологіях**

Лактобактерії мають тривалу еволюційну історію та належать до найдавніших мікроорганізмів, що супроводжують людство протягом тисячоліть. Упродовж цього часу вони відігравали ключову роль у формуванні традицій



харчування, збереженні продуктів і підтриманні здоров'я людини та тварин. Завдяки унікальній здатності здійснювати контрольовану ферментацію вуглеводів із утворенням молочної кислоти лактобактерії здавна використовуються для виробництва широкого спектра ферментованих харчових продуктів, зокрема кисломолочних виробів, сирів, квашених овочів, сиров'ялених ковбас та інших продуктів із подовженим терміном зберігання.

Молочна кислота, як основний продукт метаболізму лактобактерій, посідає особливе місце серед біогенних органічних кислот. Її широке використання у харчовій промисловості, сільському господарстві та кормовиробництві зумовлене поєднанням консервувальних, антимікробних і регуляторних властивостей. У сільському господарстві молочна кислота сприяє підвищенню врожайності, покращенню якості продукції, підтриманню фітосанітарного стану посівів і здоров'я тварин, при цьому залишаючись екологічно безпечною та біорозкладною сполукою.

Окрім молочної кислоти, лактобактерії розглядаються як перспективні біотехнологічні платформи для синтезу широкого спектра біологічно активних сполук, включаючи підсолоджувачі, вітаміни, бактеріоцини, екзополісахариди та лігноцелюлолітичні ферменти [25]. Ці метаболіти відіграють важливу роль у біоконсервації, підвищенні поживної цінності та мікробіологічної стабільності силосу, що суттєво розширює функціональне використання інокулянтів молочнокислих бактерій у кормовиробництві. Зокрема, здатність окремих штамів синтезувати специфічні вітаміни у процесі ферментації відкриває можливість для збагачення ферментованих кормів без застосування синтетичних добавок.

Вітаміни є незамінними органічними сполуками, необхідними в строго визначених кількостях, і широко використовуються як кормові добавки. Показано, що в процесі ферментації лактобактеріями можуть синтезуватися такі вітаміни, як піридоксин, фолієва кислота, вітамін С і рибофлавін, що істотно підвищує поживну цінність ферментованих продуктів. Зокрема, штами *Lactobacillus plantarum*, *L. fermentum*, *L. acidophilus* і *L. lactis*, здатні продукувати



рибофлавін, сприяють природному збагаченню продуктів і зменшенню потреби у додатковій вітамінізації. Ці властивості також розглядаються як перспективний інструмент вирішення проблем аеробно нестабільного силосу, що характеризується затхлим або пліснявим запахом і зниженою поживною цінністю внаслідок розвитку дріжджів і пліснявих грибів [25].

Особливу увагу привертає *Lactobacillus buchneri*, здатний продукувати 1,2-пропандіол, який відіграє важливу роль у підвищенні аеробної стабільності силосу, зокрема кукурудзяного. Інокуляція цим видом не лише знижує інтенсивність окисних процесів, але й позитивно впливає на метаболічний стан молочних корів, зменшуючи ризик розвитку кетозу. Основною проблемою при зберіганні силосу є його вторинне псування при контакті з повітрям, і саме метаболіти *L. buchneri* створюють несприятливе середовище для розвитку небажаної мікрофлори, зменшуючи втрати поживних речовин і сухої речовини.

Крім того, низка молочнокислих бактерій, зокрема *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus reuteri*, *L. casei* та *L. plantarum*, здатні синтезувати екзополісахариди, які широко застосовуються як функціональні харчові добавки завдяки своїм реологічним і текстуроутворювальним властивостям. Продукування екзополісахаридів забезпечує лактобактеріям конкурентні переваги, сприяючи ефективнішій колонізації субстрату та формуванню стабільних біоплівки. У силосі ці полісахариди покращують текстурні характеристики, подовжують термін зберігання та підвищують мікробіологічну стабільність корму. Зокрема, інокуляція силосу *Pediococcus pentosaceus*, що продукує екзополісахариди, продемонструвала високу антиоксидантну й антибактеріальну активність, у тому числі повне пригнічення росту *Staphylococcus aureus*.

Важливу роль у біоконсервації відіграють також бактеріоцини — антимікробні білки або пептиди, синтезовані лактобактеріями. Ці сполуки ефективно пригнічують розвиток патогенних і умовно патогенних мікроорганізмів та широко застосовуються у силосуванні як природні консерванти [10]. Наприклад, інокуляція силосу з люцерни *Lactobacillus*



*delbrueckii*, що продукує бактеріоцин класу ІІа, призвела до суттєвого зменшення чисельності плісняви та дріжджів, покращення параметрів ферментації та підвищення аеробної стабільності порівняно з традиційним інокулянтом *L. plantarum* [24].

Окрему групу біологічно активних сполук, що продукуються лактобактеріями, становлять лігноцелюлолітичні ферменти, зокрема оксидази, пероксидази, протеази, хітинази, маннанази, амілази, пектинази, естерази, геміцелюлази та целюлази. Ці ферменти діють як біокаталізатори розщеплення лігноцелюлози — основного структурного компонента рослинної біомаси — до простіших і доступніших для травлення сполук [23]. Нещодавно такі ферменти, що продукуються представниками *Enterococcus* spp. і *Paenibacillus* spp., були ізольовані з морських трав і запропоновані для покращення якості силосованих кормів. Показано також, що деякі штами молочнокислих бактерій здатні розщеплювати олігосахариди та метаболізувати ксилізу завдяки секреції ксиланаз, ендоглюканаз, естераз і арабінофуранозидаз [22].

Крім того, встановлено, що штами *Bacillus coagulans* продукують термостабільні целюлази за умов температури та рН, сумісних із дією грибних ферментів, що використовуються для деполімеризації лігноцелюлозної біомаси до зброджуваних цукрів. Це сприяє покращенню поживного складу силосу та підвищенню його споживання тваринами.

## 12.5 Метаболічна активність лактобактерій у процесі силосування

У ранніх концепціях заготівлі кормів процес силосування трактувався як формування переважно «солодкого» або «кислого» силосу, що відображало домінування певних напрямів мікробної ферментації [20]. На сучасному етапі розвитку кормовиробництва понад 90 % основних кормових культур, зокрема кукурудза, сорго, зернові та бобові трави, а також пшениця, вирощуються безпосередньо в господарствах і консервуються переважно шляхом силосування. Це пояснюється високою ефективністю даного методу щодо збереження



поживних речовин та забезпечення стабільної якості кормів упродовж тривалого періоду зберігання.

Формування високоякісного силосу базується на складному біохімічному процесі, який передбачає спонтанну або керовану ферментацію рослинної маси молочнокислими бактеріями за анаеробних умов. У процесі життєдіяльності лактобактерії перетворюють доступні вуглеводи на молочну кислоту та інші органічні кислоти, що сприяє швидкому зниженню рН середовища, пригніченню розвитку небажаної мікрофлори та збереженню поживної цінності кормів під час їх заготівлі й зберігання [4, 12].

Таким чином, у технології силосування лактобактерії виконують подвійну функцію:

- діють як біологічні антагоністи мікроорганізмів, що спричиняють псування силосу (дріжджів, пліснявих грибів, гнильних бактерій);
- через продукти власного метаболізму, насамперед органічні кислоти, забезпечують зниження рН силосної маси та мінімізацію втрат сухої речовини в процесі ферментації і подальшого зберігання.

Результативність ферментаційних процесів за використання інокулянтів молочнокислих бактерій визначається сукупністю біохімічних і технологічних чинників, серед яких ключовими є швидке витіснення кисню із силосної маси, інтенсивність молочнокислого бродіння, достатня концентрація активних мікроорганізмів, оперативне зниження рН до стабільного рівня, зменшення буферної здатності рослинної сировини, контрольований ступінь в'янення та дотримання оптимального температурного режиму.

## **12.6 Сучасні підходи та перспективи вдосконалення**

На сучасному етапі застосування інокулянтів молочнокислих бактерій у виробництві та зберіганні силосу супроводжується низкою проблем і обмежень. Одними з основних факторів, що визначають якість силосу, залишаються температурний режим і вологість сировини. Зокрема, ефективність інокулянтів



лактобактерій у холодних кліматичних умовах є значно зниженою, оскільки низька температура навколишнього середовища пригнічує їх біологічну активність і, відповідно, інтенсивність ферментаційних процесів.

Більшість відомих штамів лактобактерій оптимально функціонують у субстратах із відносно низькою вологістю, високим вмістом водорозчинних вуглеводів і невеликою буферною здатністю. Водночас окремі кормові культури, зокрема люцерна, характеризуються високою вологістю та значною буферною ємністю, що ускладнює швидке зниження рН. Для таких видів сировини необхідні спеціалізовані інокулянти лактобактерій, здатні інтенсивно ферментувати рослинну біомасу, оперативно знижувати рН і ефективно пригнічувати розвиток патогенних мікроорганізмів. Додаткову перспективу становить використання штамів лактобактерій, які продукують лігноцелюлолітичні ферменти (целюлази, ксиланази, лаккази тощо), що сприяє підвищенню вмісту водорозчинних вуглеводів у трав'яному силосі та покращенню умов ферментації.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка нових штамів лактобактерій з унікальними ферментаційними властивостями. Традиційні підходи, засновані на природному відборі, випадковому мутагенезі або лабораторній еволюції, характеризуються низькою ефективністю та значними часовими витратами. Натомість технології редагування генома набувають дедалі більшого значення як перспективний інструмент генетичного вдосконалення лактобактерій завдяки відносній безпеці, простоті застосування та високій результативності.

Іншою серйозною проблемою силосування є утворення силосних токсинів, які становлять загрозу для здоров'я людей і тварин та можуть призводити до високого рівня захворюваності й смертності. Їх поява пов'язана з ростом і метаболічною активністю патогенних мікроорганізмів, зокрема *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Clostridium botulinum*, *Listeria monocytogenes*, а також дріжджів і пліснявих грибів у процесі силосування. Крім того, окремі токсичні сполуки, присутні в рослинних тканинах на момент збирання врожаю, здатні зберігатися



й після завершення ферментації [22].

Розвиток патогенної мікрофлори призводить до погіршення органолептичних і фізико-хімічних показників силосу, зокрема до зміни кольору, появи неприємного запаху, слизоутворення, накопичення токсичних метаболітів і зниження поживної цінності корму, що робить його непридатним або небезпечним для використання у годівлі тварин. У зв'язку з цим актуальним є створення інокулянтів лактобактерій, здатних ефективно пригнічувати ріст і метаболічну активність патогенних мікроорганізмів у процесі силосування.

### **Підсумки та висновки**

Силосування є ключовим мікробіологічним процесом, що відіграє важливу роль у збереженні кормових культур та раціональному використанні кормових ресурсів у тваринництві. Використання інокулянтів на основі лактобактерій суттєво підвищує якість силосу, оскільки вони активно беруть участь у процесах ферментації, зберігання та згодовування кормів. Застосування цих мікроорганізмів сприяє оптимізації бродіння, формуванню сприятливого мікробного середовища та пригніченню розвитку патогенних і небажаних мікроорганізмів.

Сучасні біотехнологічні підходи відкривають широкі можливості для ідентифікації, селекції та вдосконалення високоефективних штамів лактобактерій, які використовуються у виробництві силосу. Їх застосування забезпечує швидке зниження рН, покращення ферментаційних показників і аеробної стабільності корму, зменшення втрат поживних речовин, а також позитивно впливає на продуктивність і здоров'я тварин. У комплексі це сприяє підвищенню ефективності тваринницького виробництва та сталому розвитку сільського господарства.