

УДК 633.14:633.15:633.6:661.8:633.11
DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.148.3.36>

ПОКРАЩЕННЯ АЕРОБНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ КУКУРУДЗЯНОГО СИЛОСУ ЗА ДОПОМОГОЮ *LACTOBACILLUS*

Чернюк С.В. – к.с.-г.н.,

доцент кафедра безпечності

та якості харчових продуктів, сировини і технологічних процесів,

Білоцерківський національний аграрний університет

orcid.org/0000-0003-0488-3624

Крижак М.С. – аспірант кафедри безпечності

та якості харчових продуктів, сировини і технологічних процесів,

Білоцерківський національний аграрний університет

orcid.org/0009-0007-6910-2207

Метою дослідження було оцінити вплив бактеріального інокулянту L1 та препарату L2, що містить три штами *Lactobacillus*, здатні синтезувати 1,2-пропандіол і коротколанцюгові жирні кислоти, на аеробну стабільність кукурудзяного силосу. Особливу увагу приділено змінам хімічного складу корму, інтенсивності ферментаційних процесів та збереженню поживної цінності впродовж 90-добового періоду силосування.

Результати дослідження показали, що застосування інокулянтів суттєво вплинуло на перебіг консервування. Зокрема, у варіантах із L1 та L2 відзначено зниження вмісту сухої речовини, водорозчинних вуглеводів, рівня рН та показника відновлення сухої речовини порівняно з контролем. Це свідчить про активніше використання субстратів молочнокислими бактеріями та ефективніше пригнічення небажаної мікрофлори. Водночас інокульовані зразки характеризувалися підвищенням концентрації молочної, оцтової та пропіонової кислот, що вказує на інтенсифікацію процесів бродіння та формування більш стабільного кислотного середовища.

У контрольному силосі 1,2-пропандіол і 1-пропанол не виявлялися, тоді як внесення L1 і L2 підвищувало їх вміст. Це підтверджує активність гетероферментативних штамів і їх здатність до утворення додаткових метаболітів із консервувальними та фунгістатичними властивостями. Встановлено також, що застосування L1 та L2 сприяло подовженню періоду аеробної стабільності силосу, зменшенню інтенсивності вторинного нагрівання та уповільненню розвитку дріжджів і пліснявих грибів після відкриття тари.

Отримані результати підтверджують доцільність використання комплексних бактеріальних інокулянтів у технології заготівлі кормів, оскільки вони забезпечують краіну збереженість поживних речовин, підвищують мікробіологічну безпечність силосу та можуть позитивно впливати на продуктивність сільськогосподарських тварин у виробничих умовах.

Ключові слова: кукурудзяний силос, аеробна стабільність бактеріальні інокулянти, *Lactobacillus*, гетероферментативні штами, ферментація, коротколанцюгові жирні кислоти, водорозчинні вуглеводи, мікробіологічна стабільність, збереження поживних речовин.

Chernyuk S. V., Kryzhak M. S. Enhancing aerobic stability of corn silage with *Lactobacillus*

The aim of the study was to evaluate the effect of the bacterial inoculant L1 and the preparation L2, containing three *Lactobacillus* strains capable of synthesizing 1,2-propanediol and short-chain fatty acids, on the aerobic stability of corn silage. Special attention was paid to changes in the chemical composition of the feed, the intensity of fermentation processes, and the preservation of nutritional value during a 90-day ensiling period. In addition, key indicators of silage quality and stability were assessed under controlled storage conditions.



© Чернюк С.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

The results showed that the use of inoculants significantly influenced the conservation process. In particular, silages treated with L1 and L2 demonstrated a decrease in dry matter, water-soluble carbohydrates, pH, and dry matter recovery compared to the control, indicating more active substrate utilization by lactic acid bacteria and more effective inhibition of undesirable microflora. At the same time, inoculated samples were characterized by increased concentrations of lactic, acetic, and propionic acids, reflecting intensified fermentation and the formation of a more stable acidic environment.

In the control silage, 1,2-propanediol and 1-propanol were not detected, whereas their content increased after L1 and L2 application, confirming the activity of heterofermentative strains and their ability to produce additional metabolites. The use of inoculants also extended aerobic stability, reduced secondary heating, and slowed the growth of yeasts and molds after opening, ensuring improved resistance to spoilage during storage.

The results confirm the effectiveness of bacterial inoculants for improving nutrient preservation, microbiological safety, and overall silage quality under practical conditions.

Key words: corn silage, aerobic stability, bacterial inoculants, *Lactobacillus*, heterofermentative strains, fermentation, short-chain fatty acids, water-soluble carbohydrates, microbiological stability, nutrient preservation.

Актуальність теми дослідження. Молочнокислі бактерії використовуються як основний мікробіологічний модифікатор, який може покращити хімічний склад силосу [1]. Ці бактерії можуть збільшити швидкість відновлення сухої речовини та покращити мікробіологічний стан силосу, який визначається вмістом цвілі та дріжджів [2]. Варто зазначити, що оцтова кислота, що виробляється гетероферментативними молочнокислими бактеріями, може змінювати метаболізм дріжджів та покращувати аеробну стабільність силосу. Однак гетероферментативні штами бактерій неефективно метаболізують молочну кислоту, оскільки вони споживають велику кількість енергії в цьому процесі. Це є недоліком, який призводить до більшої втрати поживних речовин [3]. Тому доцільним є використання сумішей гетероферментативних і гомоферментативних молочнокислих штамів залежно від виду силосованої рослинної сировини [4]. Як альтернативу, можна використовувати ферментні препарати, але вони дорожчі та складніші у приготуванні. Існують значні розбіжності в результатах останніх досліджень щодо типу використовуваних добавок. Вони поділяються на різні групи: «гомо-» (гомоферментативні бактерії), «гетеро-» (гетероферментативні бактерії), «комбіновані» (гомоферментативні плюс гетероферментативні бактерії) та «хімічні» (хімічні добавки) [4].

Гомоферментативні бактеріальні інокулянти ферментують водорозчинні вуглеводи в органічні кислоти, особливо молочну кислоту, яка швидко підкислює силос та пригнічує ріст небажаних бактерій. Гетероферментативні бактеріальні інокулянти ферментують водорозчинні вуглеводи в такі кислоти як оцтова та пропіонова, які пригнічують ріст грибів, що викликають псування силосної маси. Комерційно доступні інокулянти містять один або обидва типи молочнокислих бактерій. Досі мало досліджень в яких одночасно порівнювали кілька інокулянтів з хімічними добавками [6].

Останніми роками проведено численні дослідження, присвячені застосуванню селекціонованих штамів молочнокислих бактерій, зокрема *Lactobacillus buchneri*. Згідно з результатами, цей гетероферментативний штам покращує аеробну стабільність силосу. Крім того, він анаеробно розкладає молочну кислоту до оцтової кислоти та 1,2-пропандіолу. Ймовірно, 1,2-пропандіол є проміжним метаболітом, який розкладається на 1-пропанол та пропіонову кислоту *Lactobacillus diolivorans*. *Lactobacillus reuteri* може синтезувати кобаламін, який є коферментом для діолдегідратази – ферменту, що каталізує перетворення 1,2-пропандіолу на 1-пропанол та пропіонову кислоту [7].

Під час коферментації бактеріальні штами зазначених видів стимулюють синтез оцтової, пропіонової кислот та 1,2-пропандіолу, що сприяє підвищенню аеробної стабільності силосу. Результати дослідження стали підґрунтям для

розроблення бактеріальних препаратів, призначених для інтенсифікації процесу силосування відновлюваної рослинної сировини [8].

Постановка проблеми. Метою цього дослідження є визначення впливу бактеріального препарату та суміші штамів *L. buchneri* на 1,2-пропандіол та 1-пропанол, хімічний склад та аеробну стабільність кукурудзяного силосу.

Методика досліджень. 1. Рослинний матеріал. Для досліджень використовували силосні гібриди кукурудзи з високою врожайністю зеленої маси (40–70 т/га) та доброю перетравністю. Вони характеризуються значною висотою рослин, розвиненою листовою поверхнею, збалансованим вмістом крохмалю і цукрів та подовженим періодом збирання. Використано гібрид МАС 28А (MAS Seeds, FAO 270), який відзначається високою врожайністю сухої речовини, ефектом STAY GREEN і придатністю до силосування. Дослідження проводили в умовах ПРАТ ПК «Поділля» (Вінницька обл.).

Дослідження проводили в умовах ПРАТ ПК «Поділля», с. Дзигівка, Могилів-Подільський район, Вінницька область.

2. Бактеріальні препарати для консервування силосу. Для силосування застосовували два препарати: L1 (штами *Lactobacillus plantarum*, *L. brevis*, *L. buchneri*) та L2 (*L. buchneri*, *L. reuteri*, *L. dioliovorans*), концентрація – 10^9 КУО/г, доза – 5 г/т. Інокуляцію здійснювали під час подрібнення маси (1,5–2,0 см) шляхом рівномірного розпилення водного розчину.

3. Силосування та оцінка аеробної стабільності. Масу ущільнювали в траншеях і герметизували. Ферментація тривала 90 діб при $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Аеробну стабільність визначали як час підвищення температури силосу на $\geq 2^\circ\text{C}$ відносно навколишнього середовища.

4. Мікробіологічний та хімічний аналізи. Бактерії молочнокислого бродіння культивували на агарі MRS (Oxoid) (35°C , 48 год.), дріжджі та плісняві гриби – на OGYE (Oxoid) (25°C , 5 діб).

Вміст органічних кислот, спиртів і 1,2-пропандіолу визначали газовою хроматографією. Хімічний склад визначали за ДСТУ ISO та методом Van Soest.

5. Статистичний аналіз. Дані обробляли методом GLM, достовірність оцінювали за тестом Тьюкі.

Результати досліджень. Основні показники хімічного складу силосованого кукурудзяного корму, а також чисельність молочнокислих бактерій, дріжджів та пліснявих грибів наведені в таблиці 1. Ця таблиця дозволяє наочно порівняти вплив різних методів обробки та інокуляції на якість корму.

Таблиця 1

Хімічний склад та кількість мікроорганізмів у зеленому кормі кукурудзи перед силосуванням

Показник	Значення
Суха речовина, (г/кг)	403
pH	5,65
Сирий протеїн, (г/кг)	94,
Водорозчинні вуглеводи (г/кг)	74,8
LAB log КУО г ⁻¹	6,9
Дріжджі, log КУО г ⁻¹	7,5
Плісняві гриби КУО г ⁻¹	6,4

У таблиці 2 наведено детальний хімічний склад силосу та чисельність мікроорганізмів після 90 днів ферментації. Аналіз показав, що концентрація сухої

речовини та вміст сухої речовини в силосі, обробленому бактеріальними інокулянтами L1 та L2, були значно нижчими ($P < 0,05$) порівняно з контрольними зразками, що не отримували інокуляції. Інокульовані зразки також демонстрували значно нижчі значення рН та зниження індексу відновлення сухої речовини ($P < 0,05$), що свідчить про активну ферментаційну діяльність доданих штамів.

Вміст молочної кислоти (LA), оцтової кислоти (AA) та пропіонової кислоти (PA) у силосі з інокуляцією виявився значно вищим ($P < 0,05$) порівняно з контролем, що підтверджує ефективність використаних бактеріальних культур у покращенні процесу бродіння. При цьому внесення інокулянтів не справляло суттєвого впливу на концентрацію етанолу та сирого протеїну (CP) ($P > 0,05$), що свідчить про специфічну дію штамів на органічні кислоти, не порушуючи загальний вміст поживних речовин.

Інокуляція сумішами штамів *Lactobacillus* спричинила значне ($P < 0,05$) збільшення чисельності молочнокислих бактерій та одночасне зменшення ($P < 0,05$) популяцій дріжджів і плісняви, підвищуючи мікробіологічну стабільність силосу. У контрольних зразках 1,2-пропандіол та 1-пропанол не визначалися, тоді як додавання L1 та L2 значно підвищувало їх концентрації ($P < 0,05$). При цьому вміст 1,2-пропандіолу та 1-пропанолу в силосі з інокуляцією L2 був відносно на 62% та 75% вищим, ніж у силосі з інокуляцією L1, що демонструє більшу ефективність комбінації штамів L2 у стимулюванні синтезу низькомолекулярних спиртів.

Таким чином, результати дослідження свідчать, що бактеріальні інокулянти не лише модифікують хімічний склад силосу, підвищуючи концентрацію органічних кислот, але й впливають на мікробіологічну структуру, збільшуючи чисельність молочнокислих бактерій та пригнічуючи розвиток дріжджів і плісняви, а також стимулюють утворення 1,2-пропандіолу та 1-пропанолу, особливо при використанні штамів L2.

Таблиця 2

Вплив інокуляції різними штамами *Lactobacillus* на якість, хімічний склад та кількість мікроорганізмів у кукурудзяному силосі

Показник	Контроль	Дослід 1	Дослід 2
Суха речовина, (г/кг)	383	369	371
рН	4,10	3,96	3,72
Сирий протеїн, (г/кг ⁻¹)	92,5	92,0	91,8
Водорозчинні вуглеводи сухої речовини (г/кг ⁻¹)	42,5	36,3	32,1
LA, %	5,1	6,7	6,8
AA, %	0,9	2,5	3,0
PA, % СУ	0	0,9	1,3
1,2-Пропандіол, % DM	0	0,49	1,4
1-Пропанол, % DM	0	0,17	0,7
Етанол, % DM	0,8	0,6	0,7
Відновлення сухої речовини (г/кг сухої речовини)	94,92	91,32	92,00
LAB, log КУО г ⁻¹	6,50	8,31	8,38
Дріжджі, log КУО г ⁻¹	5,01	4,15	3,86
Плісняві гриби, log КУО г ⁻¹	5,09	5,00	4,60

У таблиці 3 показано зміни хімічного та мікробіологічного складу силосу після впливу кисню. Інокуляція штамами L1 і L2 уповільнила підвищення рН, що свідчить про кращу аеробну стабільність.

У зразках з інокуляцією відмічено вищий вміст оцтової та пропіонової кислот і дещо нижчий рівень молочної кислоти, що вказує на зміну напрямку ферментації під час аерації. Кількість молочнокислих бактерій була вищою, тоді як дріжджі та плісняві гриби – нижчою порівняно з контролем.

У контрольних зразках після аерації 1,2-пропандіол і 1-пропанол не виявлялися, тоді як у силосах з L1 та L2 їх рівень залишався стабільним.

Отже, інокулянти L1 і L2 підвищують аеробну стабільність силосу, підтримуючи активність LAB, органічні кислоти та пригнічуючи небажану мікрофлору.

Таблиця 3

Хімічний склад та кількість мікроорганізмів у кукурудзяному силосі після тесту на аеробну стабільність

Показник	Контроль	Дослід 1	Дослід 2
pH	6,3	5,01	4,97
LA, %	5,2	5,6	4,4
AA, %	1,8	3,4	4,8
PA, % СУ	0	0,75	1,0
1,2-Пропандіол, % DM	0	0,5	1,4
1-Пропанол, % DM	0	0,2	0,7
LAB, log КУО г ⁻¹	6,02	8,01	8,1
Дріжджі, log КУО г ⁻¹	8,4	7,17	6,18
Плісняві гриби, log КУО г ⁻¹	7,2	6,2	5,03

На рисунку 1 наведено динаміку зміни температури під час визначення аеробної стабільності силосу. Інокуляція сумішами L1 та L2 значно подовжила час збереження стабільності силосу. У контрольному зразку температура підвищилася на 2°C протягом 72 годин, тоді як інокульовані силоси демонстрували значно триваліший період стабільності: 103 години для L1 та 102 години для L2. Це свідчить про ефективність бактеріальних інокулянтів у підтримці аеробної стабільності та пригніченні небажаної мікрофлори під час контакту силосу з киснем.

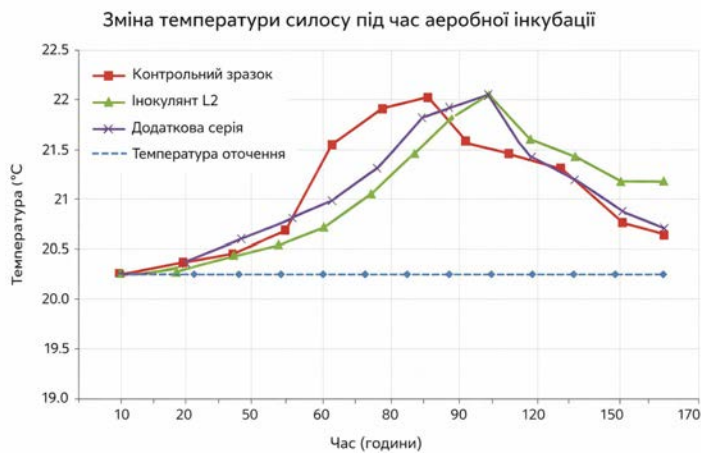


Рис. 1. Зміна температури кукурудзяного силосу під час випробування на аеробну стабільність

Згідно з дослідженням [12], під час контакту силосу з повітрям підвищуються рН і температура через доступ кисню.

Штами *Lactobacillus* застосовують для підвищення аеробної стабільності силосу. У нашій роботі порівнювали комерційний препарат і суміш гетероферментативних штамів *L. buchneri*, *L. dioliovorans* та *L. reuteri*. Подібні ефекти синергії між штамми описані в літературі [13]. Ці бактерії здатні перетворювати 1,2-пропандіол на пропіонову кислоту та 1-пропанол [14].

Попередні дослідження [15] показали, що *L. buchneri* підвищує рівень оцтової кислоти та 1,2-пропандіолу і знижує вміст молочної кислоти. Наші результати це підтверджують, хоча надлишок оцтової кислоти може погіршувати смак корму.

Також повідомлялося [15], що *Lactobacillus* знижують рН і вміст водорозчинних речовин, що частково узгоджується з нашими даними, хоча в інших роботах фіксували інші тенденції щодо кислот.

Під час аеробної інкубації в інокульованих зразках зростала оцтова кислота та знижувалася молочна, що супроводжувалося зменшенням рН. Інокулянти не вплинули на вміст сирого протеїну (СР), хоча в окремих дослідженнях відзначали його підвищення.

Також *Lactobacillus* зменшували чисельність дріжджів і плісняви, причому L2 був найефективнішим. Антигрибковий ефект залежить від умов ферментації, складу субстрату та рН.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дослідження показали, що силоси з *Lactobacillus* мали вищу аеробну стабільність порівняно з контролем. Це пов'язано з підвищеним вмістом оцтової та пропіонової кислот, зниженням рН і пригніченням дріжджів та плісняви, що зменшувало вторинне нагрівання і втрати поживних речовин.

У зразках з гетероферментативними штамми також спостерігали накопичення 1,2-пропандіолу та 1-пропанолу, що відображає активність специфічних шляхів ферментації. Перетворення 1,2-пропандіолу на пропіонову кислоту посилює антимікробний ефект.

Отримані результати свідчать, що комбіновані культури *Lactobacillus* можуть діяти синергічно, покращуючи стабільність і гігієнічну якість силосу та зменшуючи ризик мікотоксинів.

Отже, використання сумішей гетероферментативних штамів є перспективним напрямом удосконалення силосування, особливо за умов можливого контакту з киснем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Weinberg Z.G., Muck R.E., Weimer P.J. The survival of silage inoculant lactic acid bacteria in rumen fluid. *J Appl Microbiol.* 2003; 94(6):1066-71. doi: 10.1046/j.1365-2672.2003.01942.x. PMID: 12752816.
2. Dehghani M.R., Weisbjerg M.R., Hvelplund T., Kristensen N.B. Effect of enzyme addition to forage at ensiling on silage chemical composition and NDF degradation characteristics. *Livest Sci.* 2012; 150:51–58. doi.org/10.1016/j.livsci.2012.07.031.
3. Filya I. The effect of *Lactobacillus buchneri*, with or without homofermentative lactic acid bacteria, on the fermentation, aerobic stability and ruminal degradability of wheat, sorghum and maize silages. *J Appl Microbiol.* 2010; 95:1080–6. doi: 10.1046/j.1365-2672.2003.02081.x.
4. Kleinschmit D.H., Kung Jr L. The effects of *Lactobacillus buchneri* 40788 and *Pediococcus pentosaceus* R1094 on the fermentation of corn silage. *J Dairy Sci.* 2006 b;89:3999–4004. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72443-2.

6. Queiroz O.C.M., Arriola K.G., Daniel J.L.P., Adesogan A.T. Effects of 8 chemical and bacterial additives on the quality of corn silage. *J. Dairy Sci.* 2013; 96:5836–43. doi: 10.3168/jds.2013-6691.
7. Toraya T. The structure and mechanism of action coenzyme B12 dependent diol dehydratase. *J. Mol Catal B. Enzym.* 2011; 10:87–106.
8. Zielinska K., Fabiszewska A., Swiatek M., Szymanowska-Powalowska D. Evaluation of the ability to metabolize 1,2-propanediol by heterofermentative bacteria of the genus *Lactobacillus*. *Electron J Biotechnol.* 2017; 26:60–63.
9. ДСТУ ISO 6496:2005. Корми для тварин. Визначення вмісту вологи та інших легких речовин (ISO 6496:1999, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 7 с.
10. ДСТУ EN ISO 5983-1:2022. Корми для тварин. Визначення вмісту азоту та розрахунок вмісту сирого протеїну. Частина 1: Метод К'ельдаля (EN ISO 5983-1:2005, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2023. 10 с.
11. ДСТУ ISO 6865:2004. Корми для тварин. Визначення вмісту сирової клітковини методом проміжного фільтрування (ISO 6865:2000, IDT). Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 9 с.
12. Van Soest, P.J., Robertson, J.B., & Lewis, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74, 3583–3597.
13. Muck R.E., Nadeau E.M.G., McAllister T.A., Contreras-Govea F.E., Santos M.C., Kung Jr L. Silage review: recent advances and future uses of silage additives. *J Dairy Sci.* 2017; 101:3980–4000. doi: 10.3168/jds.2017-13839.
14. Driehuis F., Oude Elferink S.J., Van Wijkelaar P.G. Fermentation Characteristics and aerobic stability of grass silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*, with or without homofermentative lactic acid bacteria. *Grass Forage Sci.* 2001; 56:330–43
15. Oliveira A.S., Weinberg Z.G., Ogunade I.M., Cervantes A.A.P., Arriola K.G., Jiang Y., et al. Meta-analysis of effects of inoculation with homofermentative and facultative heterofermentative lactic acid bacteria on silage fermentation, aerobic stability, and the performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2017; 100:4587–603. doi: 10.3168/jds.2016-11815.

Дата першого надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026