

Phagocytic activity of leukocytes in pigs exposed to nanoaquachelates considering autonomic nervous system types

P. Khymynets¹ | V. Karpovskiy¹  | O. Zhurenko¹ | R. Nahorets¹ | R. Grelya¹ | I. Hryshchuk¹ | P. Karpovskiy² | O. Kovalchuk¹

Article info

Correspondence Author

V. Karpovskiy

E-mail:

karpovskiy@meta.ua

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Defence Str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

² Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, 24 Maiatska Doroha St., Khlivobarske Settlement, Odesa District, Odesa Region, 67667, Ukraine

Citation: Khymynets, P., Karpovskiy, V., Zhurenko, O., Nahorets, R., Grelya, R., Hryshchuk, I., Karpovskiy, P., & Kovalchuk, O. (2026). Phagocytic activity of leukocytes in pigs exposed to nanoaquachelates considering autonomic nervous system types. *Scientific Progress & Innovations*, 29(1), 110–116. doi: 10.31210/spi2026.29.01.18

The development and evaluation of feed additives that ensure the stability of the immune system in pigs is a pressing issue today, as technological stress has a negative impact on this indicator. The aim of the study was to determine changes in the phagocytic activity of leukocytes when using nanoaquachelates in pigs, taking into account the individual characteristics of their organisms. The groups of animals were formed using a variational-pulsometric study, which resulted in three groups: sympathotonics, vagotonics, and normotonics, which were then divided into control and experimental groups. The experimental groups were given a mixture of nanoaquachelates at a dose of 3 mg/day of iron and 0.01 mg/day of germanium per head. The results of phagocytic activity of leukocytes were evaluated using a spectrophotometer, and the results obtained were calculated using a calibration graph. According to the data obtained, it was established that in normotonic animals of the experimental group, compared to the control group, on day 40, leukocyte activity was 6.5 % higher ($P < 0.01$), and on day 70 of the study, this indicator was 6.2 % higher ($P < 0.01$). In vagotonic patients in the experimental group, compared to the control group, there was an increase in the indicator by 5.2 % ($P < 0.05$) after 40 days and by 6.4 % ($P < 0.01$) at the end of 70 days. In sympathotonics in the experimental group compared to the control group, there was an increase in the indicator on day 40 of 4.7 % ($P < 0.01$) and on day 70 of 4.8 % ($P < 0.01$). According to the results of the study, it was found that, depending on the individual characteristics of the pigs' organism, the indicators of phagocytic activity of leukocytes when using a feed additive differ in their values, which is caused by the activity of the autonomic nervous system. Further research involves determining the appropriate doses of nanoaquachelates for each group individually in order to achieve the greatest effectiveness of the modified diet in terms of the immune system.

Keywords: feed additives, productive animals, immunity, blood, diet.

Фагоцитарна активність лейкоцитів у свиней з урахуванням автономної нервової системи при застосуванні наноаквахелатів

П. С. Химинець¹ | В. І. Карповський¹ | О. В. Журенко¹ | Р. В. Нагорець¹ | Р. В. Греля¹ | І. А. Грищук¹ | П. В. Карповський² | О. О. Ковальчук¹

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

² Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН України, с. Хлібодарське, Одеська обл., Україна

Розробка та оцінка кормових добавок, які забезпечують сталість імунної системи свиней, актуальне питання сьогодення, адже технологічний стрес досить негативно впливає на даний показник. Метою дослідження було встановити зміни фагоцитарної активності лейкоцитів при використанні наноаквахелатів у свиней з урахуванням індивідуальних особливостей їхнього організму. Групи тварин формували за допомогою варіаційно-пульсометричного дослідження, завдяки чому, було отримано три групи: симпатотоніки, ваготоніки, нормотоніки, які потім розподілили на контрольну і дослідну. Дослідним групам випоювали суміш наноаквахелатів у дозі на голову феруму – 3 мг/добу та германію – 0,01 мг/добу. Результати фагоцитарної активності лейкоцитів оцінювали за допомогою спектрофотометра, а отримані результати вираховували за допомогою калібрувального графіка. Згідно з отриманими даними дослідження встановлено, що у нормотоніків дослідної групи відносно контрольної на 40-й день була більша активність лейкоцитів на 6,5 % ($P < 0,01$), а на 70-й день дослідження даний показник становив на 6,2 % ($P < 0,01$) більше. У ваготоніків дослідної групи відносно контрольної групи був приріст показника на 5,2 % ($P < 0,05$) після 40 днів та на 6,4 % ($P < 0,01$) на 70-й день. У симпатотоніків дослідної групи відносно контрольної групи був приріст показника на 4,7 % ($P < 0,01$), а на 70-й день 4,8 % ($P < 0,01$). Згідно з результатами дослідження встановлено, що залежно від індивідуальних особливостей організму свиней показники фагоцитарної активності лейкоцитів при застосуванні кормової добавки мають відмінності, спричинені активністю автономної нервової системи. Подальше дослідження полягає у формуванні відповідних доз наноаквахелатів для кожної групи індивідуально, щоб отримати найбільшу ефективність модифікованого раціону з боку імунної системи. Впровадження такого індивідуального підходу в практику свинарства дозволить підвищити резистентність організму тварин та нівелювати наслідки інтенсивного технологічного стресу.

Ключові слова: кормові добавки, продуктивні тварини, імунітет, кров, раціон.

Бібліографічний опис для цитування: Химинець П. С., Карповський В. І., Журенко О. В., Нагорець Р. В., Греля Р. В., Грищук І. А., Карповський П. В., Ковальчук О. О. Фагоцитарна активність лейкоцитів у свиней з урахуванням автономної нервової системи при застосуванні наноаквахелатів. *Scientific Progress & Innovations*. 2026. № 29 (1). С. 110–116.



Вступ

Свинарство сьогодення стало розвиватися саме завдяки постійному контролю таких факторів, як фізіологічні, екологічні та соціальні. Нехтування цим стає причиною негативних наслідків для здоров'я тварин, що спричинює зменшення продуктивності [5, 18]. За рахунок цього ефективною стратегією управління свинокомплексами є підтримання здоров'я поголів'я. Одним із актуальних питань покращення є питання, пов'язані із оцінкою стану імунної системи. І у разі потреби, застосовувати методи покращення її функціонування [19, 21].

Для зменшення використання антимікробних препаратів, що покращують здатність організму тварини протидіяти патогенним факторам, часто використовують різні комбінації кормових добавок із мікроелементами. Залежно від дози та частоти їх застосування, можна регулювати багато фізіологічних процесів в організмі. Наприклад, використання германію спричинює покращення функціонування імунної системи [4, 13]. Це забезпечується завдяки тому, що він підвищує активність макрофагів, НК-клітин, Т-клітин та утворення антитіл. Такі особливості сприяють його використанню як одного із компонентів імуностимулятора у тварин. Також досить часто використовують залізо у комбінаціях з іншими мінеральними речовинами. Даний хімічний елемент продемонстрував себе досить добре у покращенні організму з боку антиоксидантної системи та енергетичному обміні. Що позитивно відображається на інших функціональних системах [6, 15].

Однак при застосуванні кормових добавок досить часто формують лише дві групи – контрольну і дослідну для оцінки ефективності. За рахунок цього не враховуються фізіологічні особливості організму тварини. Тому досить часто використання різних раціонів годівлі має значну розбіжність у показниках під час оцінки здоров'я свиней [8, 14]. Найбільш ефективним та швидким методом дослідження індивідуальних особливостей тварин, є визначення впливу відділів автономної нервової системи на організм. Адже саме вони забезпечують в більшій мірі корекцію метаболічних процесів залежно від впливу зовнішніх факторів і першими активуються у протидії стресовим факторам [7, 23].

Тому вивчення впливу кормової добавки на показники бактерицидної активності з урахуванням впливу автономної нервової системи є актуальним питанням сьогодення.

Мета дослідження

Дослідити зміни фагоцитарної активності лейкоцитів у свиней з урахуванням індивідуальних особливостей організму при застосуванні наноаквахелатів.

Матеріали і методи

Експериментальні дослідження виконувалися на базі свинокомплексу ТОВ «Кошет» (село Чопівці, Мукачівського району, Закарпатської області) у 2025 році.

Формування груп тварин виконувалося у два етапи. Перший полягав у формуванні трьох груп відповідно до тонусу автономної нервової системи, за допомогою варіаційно-пульсометричного дослідження. Другий етап стосувався формування з кожної отриманої групи симпатотоніків, ваготоніків та нормотоніків контрольних та дослідних груп. Дослідним групам випоювали суміш наноаквахелатів в дозі на голову заліза – 3 мг/добу та германію – 0,01 мг/добу. Відбір крові виконували із краніальної порожнистої вени в місці жолобу, утвореного довгими мускулами ший зліва або справа на 1–2 см збоку від трахеї та на 1–2 см вище від грудної кістки.

Фагоцитарну активність лейкоцитів вимірювали спектрофотометром, а отримані результати вираховували за допомогою калібрувального графіка.

Статистичний аналіз виконували за допомогою програми Microsoft Excel.

Результати та їх обговорення

Досліджуючи фагоцитарну активність лейкоцитів у сироватці крові свиней, були визначені показники на 40-ву та 70-ту добу у контрольної і дослідної груп. Було виконано статистичну оцінку даних для перевірки значимості результатів (*табл. 1*).

Таблиця 1

Статистичний аналіз показників фагоцитарної активності лейкоцитів у свиней нормотоніків

Нормотоніки	μ	SE	σ	s^2	A	Мін.	Макс.
Контроль 40 доба %	60,23	0,87	1,94	3,75	-0,62	57,68	62,12
Дослід 40 доба %	64,16	0,67	1,49	2,22	0,50	62,34	66,32
Контроль 70 доба %	60,54	0,90	2,01	4,04	4,84	57,88	62,72
Дослід 70 доба %	64,28	0,67	1,50	2,25	0,43	62,44	66,41

Примітки: μ – середнє значення; SE – стандартна помилка; σ – стандартне відхилення; s^2 – дисперсія вибірки; A – асиметричність; Мін. – мінімальне значення; Макс. – максимальне значення.

За статистичного аналізу отриманих даних на 40-й день використання кормової добавки на основі наноаквахелатів у дослідної групи свиней визначено малу стандартну помилку та трохи більше стандартне відхилення, що на фоні вихідного середнього значення, відображає допустимі значення даних величин. Дисперсійна вибірка, за аналізу вибірки від п'яти тварин відображає досить малу розсіяність значень. Асиметричність описується як негативна мала. Різниця між максимальним і мінімальним значенням у 3,98 % додатково свідчить про невелику розбіжність даних, враховуючи величину середнього показника.

70-й день мав дещо кращі показники в загальному по п'яти тваринах з боку статистичного аналізу, підставами чого стали показники стандартної помилки та стандартного відхилення, що відіграють роль у оцінці точності результатів. З урахуванням цього, вони були меншими в порівнянні з 40-м днем даної групи. Дисперсійна вибірка із п'яти показників фагоцитарної активності лейкоцитів описується як невелика розбіжність за оцінкою середнього

значення. Асиметричність була мало позитивною. Різниця між максимальним і мінімальним значенням становила 3,97 %, що описує незначну розбіжність результатів.

Показники фагоцитарної активності сироватки крові контрольної групи на 40-й день характеризувалися малою стандартною помилкою та трохи більшим стандартним відхиленням, за показником середнього значення відносяться до допустимих меж. Дисперсійна вибірка при зіставленні із середнім значенням п'яти показників відображає досить малу розсіяність значень у даній вибірці. Асиметричність описується як позитивна мала. Різниця між максимальним і мінімальним значенням у 4,44 % свідчить про невелику розбіжність даних, враховуючи величину середнього показника.

На 70-й день статистичні показники у контрольній групі дещо збільшилися, загалом по п'яти тваринах. Це може свідчити про відсутність фактора, що сприяє корекції даного показника, як, наприклад, у дослідній групі. Однак показники стандартної помилки та стандартного відхилення, що відіграють роль в оцінці точності результатів, залишалися досить низькими. Дисперсійна вибірка із п'яти показників фагоцитарної активності лейкоцитів, описується як невелика розбіжність при оцінці середнього значення. Асиметричність була незначно позитивною. Різниця між максимальним і мінімальним значенням становила 4,84 %, що описує незначну розбіжність результатів.

Досліджуючи фагоцитарну активність лейкоцитів у сироватці крові свиней ваготоніків, встановлено показники на 40-ву та 70-ту добу у контрольній і дослідній груп. Було виконано статистичну оцінку даних для перевірки значимості результатів (*табл. 2*).

Таблиця 2

Статистичний аналіз показників фагоцитарної активності лейкоцитів у свиней ваготоніків

Ваготоніки	μ	SE	σ	s^2	A	Мін.	Макс.
Контроль 40 доба	58,87	0,70	1,56	2,42	-0,56	57,12	60,23
Дослід 40 доба	61,93	0,64	1,44	2,06	0,20	60,08	63,91
Контроль 70 доба	58,80	0,68	1,52	2,31	-0,62	56,97	60,03
Дослід 70 доба	62,55	0,55	1,22	1,49	0,87	61,49	64,34

Примітки: μ – середнє значення; SE – стандартна помилка; σ – стандартне відхилення; s^2 – дисперсія вибірки; A – асиметричність; Мін. – мінімальне значення; Макс. – максимальне значення.

Статистичні показники 40-го дня застосування кормової добавки на основі наноаквахелатів у дослідній групі свиней мали невелику стандартну помилку та трохи більше стандартне відхилення, при врахуванні значення середнього показника описує невеликі значення даних величин. Дисперсія вибірки п'яти показників оцінюється як мала розсіяність значень. Асиметричність характеризувалася малою позитивністю. Різниця між максимальним і мінімальним значенням у 3,83 % свідчить про невелику розбіжність даних, враховуючи величину середнього показника.

На 70-й день загальні статистичні показники по п'яти дослідним групам тварин, такі як стандартна помилка та стандартне відхилення, були меншими в порівнянні з 40-м днем, що описує меншу розбіжність даних. Дисперсійна вибірка характеризувала малу розсіяність статистичних показників. Асиметричність була невеликою позитивною. Різниця між максимальним і мінімальним значенням становила 2,85 %, що описує незначну розбіжність результатів.

Фагоцитарна активність лейкоцитів контрольної групи свиней ваготоніків мала відносно недовго великі показники стандартної помилки та стандартного відхилення, що спираються на підставі середнього значення, отриманого від п'яти тварин. Дисперсійна вибірка відображала невеликий розподіл отриманих показників. Асиметричність представлена негативною з малою асиметричністю даних. Показники різниці максимального та мінімального значення, що становлять 3,11 %, відображають незначну розсіяність результатів фагоцитарної активності лейкоцитів.

Розглядаючи показники 70-го дня дослідження у контрольній групі ваготоніків, варто відзначити незначну зміну статистичних даних. Стандартна помилка та стандартне відхилення, були відносно сталими в порівнянні з 40-м днем та в межах допустимих значень. Дисперсна вибірка в межах п'яти змінних показників, відображає невелику розбіжність вихідних значень. Асиметричність була негативною та незначно асиметричною. Значення різниці максимального та мінімального значення в 3,06 % додатково підтверджує точність отриманих результатів.

Тварини групи симпатотоніків контрольної та дослідної групи за показником фагоцитарної активності лейкоцитів мали результати на 40-й та 70-й день застосування кормової добавки наноаквахелатів, що були статистично обраховані у *таблиці 3*.

Таблиця 3

Статистичний аналіз показників фагоцитарної активності лейкоцитів у свиней симпатотоніків

Ваготоніки	μ	SE	σ	s^2	A	Мін.	Макс.
Контроль 40 доба	62,03	0,67	1,51	2,27	0,09	59,98	64,14
Дослід 40 доба	64,97	0,37	0,83	0,69	0,16	63,94	66,05
Контроль 70 доба	62,22	0,67	1,49	2,22	0,19	60,23	64,32
Дослід 70 доба	65,16	0,38	0,85	0,73	-0,14	64,01	66,24

Примітки: μ – середнє значення; SE – стандартна помилка; σ – стандартне відхилення; s^2 – дисперсія вибірки; A – асиметричність; Мін. – мінімальне значення; Макс. – максимальне значення.

Контрольна група свиней на 40-й день згідно зі статистичною оцінкою мала показники стандартної помилки та стандартного відхилення в межах допустимих значень, незважаючи на трохи більші показники стандартного відхилення. Дисперсія вибірки з урахуванням величини середнього показника свідчить про допустиму розбіжність отриманих результатів. Асиметричність даних відображена позитивною симетричною. Різниця між макси-

мальним і мінімальним значенням у 4,16 % вказує на незначну розбіжність результатів.

На 70-й день дослідження контрольна група симпатотоніків мала незначні зрушення показників фагоцитарної лейкоцитарної активності, що спричинено відсутністю фактора впливу на перемінні. Стандартна помилка та відхилення дотичні до допустимих змінних, що спричинені величиною середнього значення. Дисперсна вибірка мала невелику розбіжність значень фагоцитарної активності. Асиметричність позитивна з наближеною симетричністю. Показник різниці максимального та мінімального значення в 4,09 % характеризує невелику відмінність вихідних значень.

Дослідна група симпатотоніків на 40-й день застосування харчової добавки наноаквахелатів характеризувалася кращими результатами стандартної помилки та відхилення в порівнянні з контрольною групою. Дисперсна вибірка мала досить невеликі значення, що свідчать про малу розбіжність показників. Асиметричність позитивна з наближеною

симетричністю чисел. Різниця в 2,11 % між максимальним та мінімальним значенням, додатково підтверджує точність отриманих результатів.

70-й день у дослідній групі характеризувався сталими показниками статистичної помилки та відхилення, що підтверджують статистичну значимість даних. Розбіжність отриманих даних помірною згідно з показником дисперсної вибірки. Асиметричність негативна наближена до симетричності. Додатково, різниця в 2,23 % свідчить про незначну розбіжність даних лабораторного значення.

За оцінками між контрольною і дослідною групами нормотоніків визначено, що на 40-й день свині, які споживали кормову добавку, мали більшу активність лейкоцитів на 6,5 % ($P < 0,01$). На 70-й день завершення дослідження зберігається закономірність більшого результату бактерицидної активності сироватки крові саме у дослідній групі тварин, що складає на 6,2 % ($P < 0,01$) більше по відношенню до контрольної групи (рис. 1).

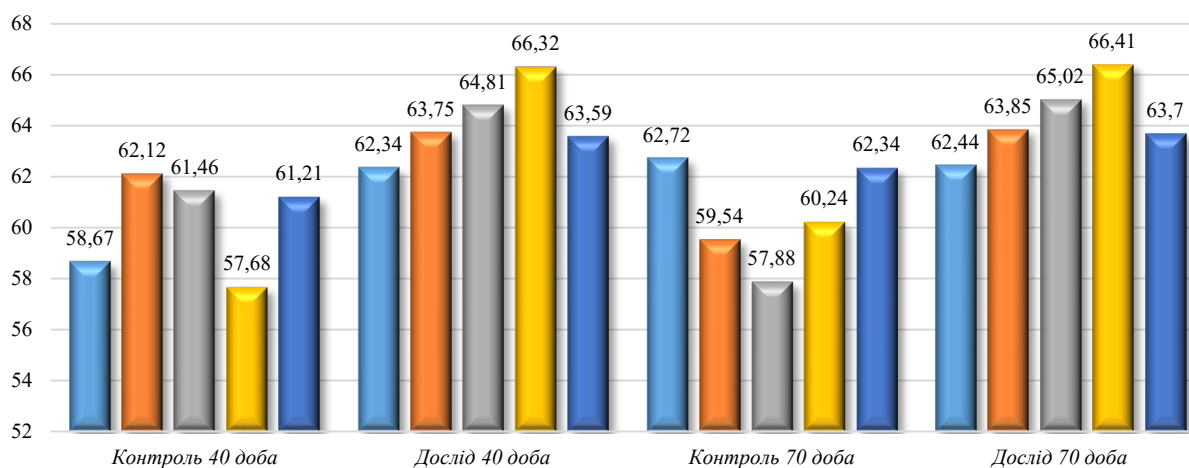


Рис. 1. Показники бактерицидної активності сироватки крові свиней контрольної і дослідної групи нормотоніків

Порівняння показників двох груп ваготоніків свідчить про зростання на 40-й день бактерицидної активності у дослідній групі на 5,2 % ($P < 0,05$) більше в порівнянні з контролем. Продовження застосування

кормової добавки на 70-й день збільшило показники бактерицидної активності сироватки крові дослідної групи свиней відносно тварин із стандартним раціоном годівлі на 6,4 % ($P < 0,01$) (рис. 2).

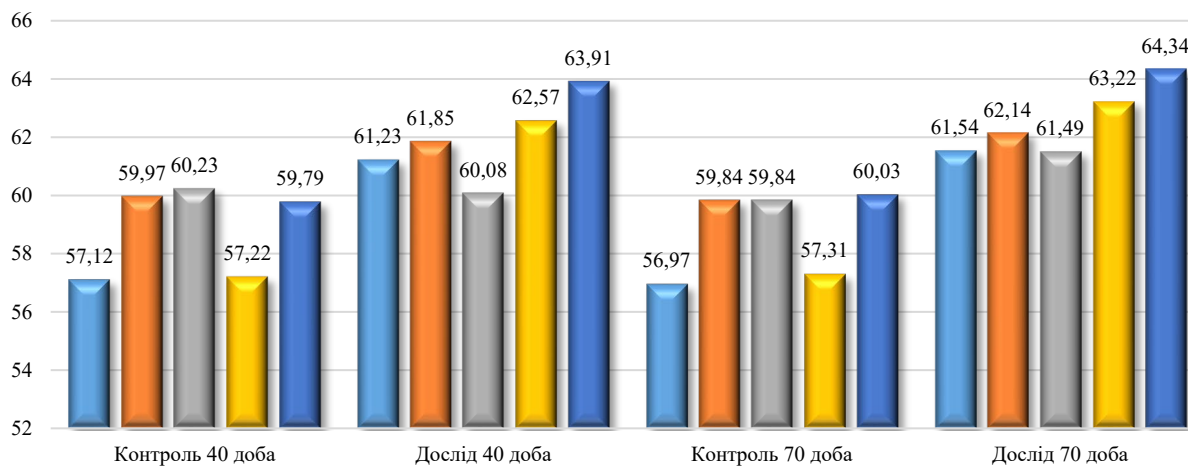


Рис. 2. Показники бактерицидної активності сироватки крові свиней контрольної і дослідної групи ваготоніків

За оцінками між контрольною і дослідною групами симпатотоніків визначено, що на 40-й день свині, які споживали кормову добавку, мали більшу активність лейкоцитів на 4,7 % ($P < 0,01$). На 70-й день завершення дослідження зберігається

закономірність більшого результату бактерицидної активності сироватки крові саме у дослідній групі тварин, що складає на 4,8 % ($P < 0,01$) більше по відношенню до контрольної групи (рис. 3).

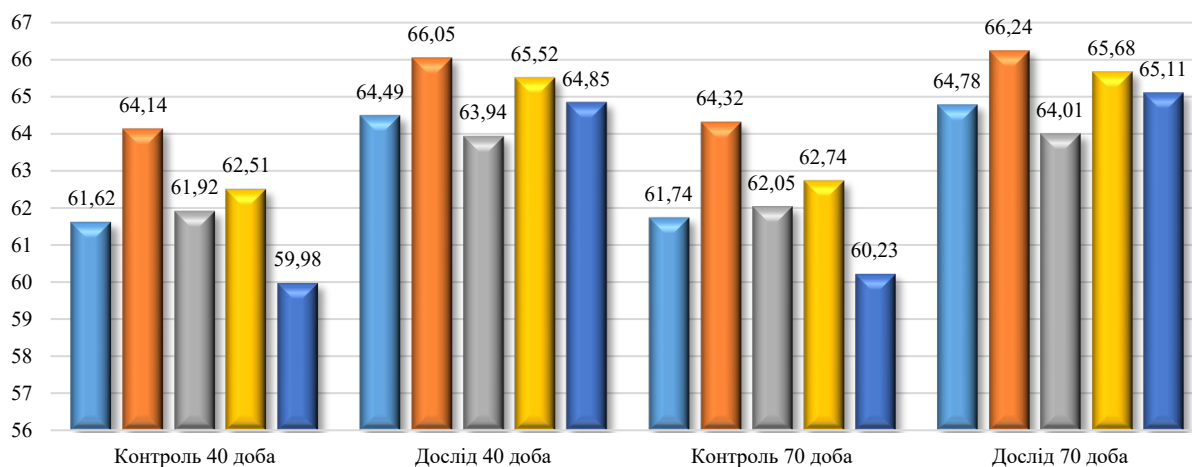


Рис. 3. Показники бактерицидної активності сироватки крові свиней контрольної і дослідної групи симпатотоніків

Роль мінералів в організмі тварин досить різноманітна, і стабілізація їхнього надходження з раціону – досить важливе завдання. Не враховуючи роль даних речовин як структурних елементів, вони забезпечують багато інших функцій [22]. Однією з яких є покращення імунної системи організму завдяки прямому або опосередкованому впливу. Імунна система досить важлива і враховується досить суттєво при вирощуванні сільськогосподарських тварин м'ясного напрямку [1, 10]. Адже порушення даної системи напряму спричинює відставання у розвитку молодняка та навіть втрату їхньої маси, що негативно відображається як на здоров'ї тварини, так і на самому господарстві. Розробка нових кормових добавок та їх реалізація набули при цьому широкого розповсюдження, адже застосування антимікробних препаратів в більшості випадків заборонено [16, 17].

Chen, J. досліджував питання щодо підвищення рівня імунітету у свиней, застосовуючи лужний мінеральний комплекс. Основною метою його роботи було покращення показників стійкості і росту поросят після відлучення, оскільки стрес, викликаний даним етапом технологічного процесу на господарстві, спричинює виникнення стресу у тварин. Наслідком цього стає погіршення імунітету, що в подальшому впливає на загальний стан організму. Незважаючи на позитивний ефект використання кормової добавки, отримані показники не мали статистично значимих вірогідностей, що спричинено, скоріше за все, тим, що тварини не формувалися відповідно до їх індивідуальних особливостей [3].

Wang, S. зі співавторами вивчали вплив мікроелементів в дозі 12 мг/кг Cu, 30 мг/кг Fe, 90 мг/кг Zn, 70 мг/кг Mn, 0,30 мг/кг Se та 1,5 мг/кг на організм свиноматок та їх потомства. Згідно з отриманими результатами прослідковувалося зростання активності імунної системи їхнього організму, що забезпечувалося стимулюванням збільшення кількості імуноглобулінів IgA, IgG та IgM. Їх концентрація

зростала у ході дослідження. Результативність отриманих показників свідчить про проблему збалансованого розподілу тварин за групами, згідно з показником стандартної помилки, відповідно до якої зростав показник P в порівнянні з нашими результатами [20].

Chen, J. зі співавторами оцінювали застосування хелатів мінеральних елементів, таких як Cu, Fe, Mn та Zn в дозі 60 мг/кг. Даний раціон годівлі мав позитивний вплив на імунну систему та антиоксидантний статус у свиней в період відгодівлі. Також автором було встановлено, що при порівнянні кормових добавок неорганічного походження та альтернатив у вигляді хелатів мінеральних елементів другі мали більшу ефективність у досягненні необхідного результату згодованих кормових добавок. Проте за оцінки показників, отриманих у ході лабораторних досліджень, виявлено, що отримані дані мали розбіжності між тваринами дослідних груп, на відміну від наших результатів, отриманих при використанні наноаквахелатів, у групах, сформованих відповідно до індивідуальних особливостей [2].

Згідно з оцінкою використання кормових добавок, показники імунної системи значно покращуються. Причиною цього є позитивна дія мінеральних елементів на рівень лейкоцитів та на обмін речовин, що спричинює непрямий вплив на імунітет тварини. Застосування кормових добавок у реаліях господарства досить вигідне, оскільки виконуються заходи для запобігання розвитку вторинних проблем організму на фоні технологічного стресу, що досить поширений у свинарстві в період відлучення та етапів відгодівлі. Детальне вивчення ефективності даних кормових добавок часто обмежується аналізом груп тварин, таких як контрольна та дослідна, що є досить часто неінформативним, за рахунок високої розбіжності показників лабораторних досліджень. Вихід з цього – це формування та врахування індивідуальних особливостей організму тварин. Згідно з нашими результатами, розподіл свиней згідно з впливом

автономної нервової системи відобразив більш точні дані щодо змін з боку імунної системи за використання наноаквахелатів.

Висновки

Встановлено, що формування свиней відповідно до індивідуальних особливостей організму перед застосуванням кормової добавки забезпечує отримання точніших результатів дослідження. Визначено, що застосування наноаквахелатів свинням покращило імунний стан організму, збільшивши при цьому фагоцитарну активність лейкоцитів, що встановлено під час аналізу показників контрольної і дослідної групи. Оцінка тонусу автономної нервової системи збільшує статистичну точність показників, отриманих від груп тварин, підставою чого є значення стандартної похибки, відхилення, дисперсної вибірки та асиметричної.

Перспектива подальших досліджень полягає у формуванні індивідуальних доз кормової добавки для кожної групи тварин для максимізації ефекту застосованого раціону годівлі.

ДЕКЛАРАЦІЇ

Етична заява

Автори підтверджують, що всі маніпуляції з тваринами проводилися з урахуванням основних принципів біоетики, відповідно до Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» [12], Європейської конвенції про захист хребетних тварин, що використовуються для експериментальних та інших наукових цілей (1986), Директиви 2010/63/EU [9] та «Загальних етичних принципів експериментів на тваринах», ухвалених Першим національним конгресом з біоетики України [11].

Фінансування

Дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів.

Подяки

Немає.

Декларація щодо використання ШІ та технологій на основі ШІ









Автори заявляють, що не використовували штучний інтелект або технології на основі ШІ під час підготовки цього рукопису.

References

1. Bujňák, L., Hreško Šamudovská, A., Mudroňová, D., Nad', P., Marcincák, S., Maskal'ová, I., Harčárová, M., Karaffová, V., & Bartkovský, M. (2023). The effect of dietary humic substances on cellular immunity and blood characteristics in piglets. *Agriculture*, 13 (3), 636. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030636>
2. Chen, J., Wang, H., Ma, Y., Zhang, Y., Wang, S., & Zang, J. (2022). Effects of the methionine hydroxyl analog chelated microminerals on growth performance, antioxidant status, and immune response of growing–finishing pigs. *Animal Science Journal*, 93 (1), e13730. <https://doi.org/10.1111/asj.13730>
3. Chen, J., Xu, Y.-R., Kang, J.-X., Zhao, B.-C., Dai, X.-Y., Qiu, B.-H., & Li, J.-L. (2022). Effects of alkaline mineral complex water supplementation on growth performance, inflammatory response, and intestinal barrier function in weaned piglets. *Journal of Animal Science*, 100 (10). <https://doi.org/10.1093/jas/skac251>
4. Christensen, B., Zhu, C., Mohammadigheisar, M., Schulze, H., Huber, L.-A., & Kiarie, E. G. (2022). Growth performance, immune status, gastrointestinal tract ecology, and function in nursery pigs fed enzymatically treated yeast without or with pharmacological levels of zinc. *Journal of Animal Science*, 100 (4). <https://doi.org/10.1093/jas/skac094>
5. Czech, A., Klimiuk, K., & Sembratowicz, I. (2023). The effect of thyme herb in diets for fattening pigs on their growth performance and health. *Plos One*, 18 (10), e0291054. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291054>
6. Deng, Z.-C., Wang, J., Wang, J., Yan, Y.-Q., Huang, Y.-X., Chen, C.-Q., Sun, L.-h., & Liu, M. (2024). Tannic acid extracted from gallnut improves intestinal health with regulation of redox homeostasis and gut microbiota of weaned piglets. *Animal Research and One Health*, 2 (1), 16–27. <https://doi.org/10.1002/aro2.51>
7. Deng, Z., Duarte, M. E., Kim, S. Y., Hwang, Y., & Kim, S. W. (2023). Comparative effects of soy protein concentrate, enzyme-treated soybean meal, and fermented soybean meal replacing animal protein supplements in feeds on growth performance and intestinal health of nursery pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14 (1), 89. <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00888-3>
8. Deng, Z., Jang, K. B., Jalukar, S., Du, X., & Kim, S. W. (2023). Efficacy of feed additive containing bentonite and enzymatically hydrolyzed yeast on intestinal health and growth of newly weaned pigs under chronic dietary challenges of fumonisin and aflatoxin. *Toxins*, 15 (7), 433. <https://doi.org/10.3390/toxins15070433>
9. Council of Europe. (1986, March 18). *European convention for the protection of vertebrate animals used for experimental and other scientific purposes* (ETS No.123). <https://rm.coe.int/168007a67b>
10. Forouzandeh, A., Blavi, L., Pérez, J. F., D'Angelo, M., González-Solé, F., Monteiro, A., Stein, H. H., & Solà-Oriol, D. (2022). How copper can impact pig growth: comparing the effect of copper sulfate and monovalent copper oxide on oxidative status, inflammation, gene abundance, and microbial modulation as potential mechanisms of action. *Journal of Animal Science*, 100 (9). <https://doi.org/10.1093/jas/skac224>
11. Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine. (2012, March 1). *Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia naukovymy ustanovamy doslidiv, eksperymentiv na tvarynah* [On approval of the Procedure for conducting research and experiments on animals by scientific institutions]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/z0416-12> [in Ukrainian]
12. Verkhovna Rada of Ukraine. (2006, February 21). *Pro zakhyst tvaryn vid zhorstokoho povodzhennia* [On the protection of animals from cruelty] (Law No. 3447-IV). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3447-15> [in Ukrainian]
13. Liao, S. F., Ji, F., Fan, P., & Denryter, K. (2024). Swine gastrointestinal microbiota and the effects of dietary amino acids on its composition and metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 25 (2), 1237. <https://doi.org/10.3390/ijms25021237>
14. Menchikov, L. G., & Popov, A. V. (2023). Physiological activity of trace element germanium including anticancer properties. *Biomedicines*, 11 (6), 1535. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11061535>
15. Meng, Q., Zhang, Y., Li, J., Shi, B., Ma, Q., & Shan, A. (2022). Lycopene affects intestinal barrier function and the gut microbiota in weaned piglets via antioxidant signaling regulation. *The Journal of Nutrition*, 152 (11), 2396–2408. <https://doi.org/10.1093/jn/nxac208>
16. Ortega, A. D. S. V., Babinszky, L., Oriedo, O. H., Csernus, B., Ozsváth, X. E., Czeglédi, L., Oláh, J., & Szabó, C. (2023). Impact of heat stress length and dietary antioxidant supplementation on the nutrient digestibility, metabolism and immune response of fattening pigs. *Annals of Agricultural Sciences*, 68 (1), 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2023.06.002>

17. Palomares, R. A. (2022). Trace minerals supplementation with great impact on beef cattle immunity and health. *Animals*, 12 (20), 2839. <https://doi.org/10.3390/ani12202839>
18. Stefanache, A., Lungu, I.-I., Butnariu, I.-A., Calin, G., Gutu, C., Marcu, C., Grierosu, C., Bogdan Goroftei, E. R., Duceac, L.-D., Dabija, M. G., Popa, F., & Damir, D. (2023). Understanding how minerals contribute to optimal immune function. *Journal of Immunology Research*, 2023, 1–26. <https://doi.org/10.1155/2023/3355733>
19. Szabó, C., Kachungwa Lugata, J., & Ortega, A. D. S. V. (2023). Gut health and influencing factors in pigs. *Animals*, 13 (8), 1350. <https://doi.org/10.3390/ani13081350>
20. Wang, S.-Q., Peng, Z., Sun, H., Han, Y.-M., Zhang, B., Pineda, L., Boerboom, G., Sun, L.-h., Liu, Y., & Deng, Z.-C. (2024). Evaluating the impact of an organic trace mineral mix on the redox homeostasis, immunity, and performance of sows and their offspring. *Biological Trace Element Research*, 203 (4), 1798–1807. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04300-7>
21. Wen, Y., Li, R., Piao, X., Lin, G., & He, P. (2022). Different copper sources and levels affect growth performance, copper content, carcass characteristics, intestinal microorganism and metabolism of finishing pigs. *Animal Nutrition*, 8, 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.10.007>
22. Weyh, C., Krüger, K., Peeling, P., & Castell, L. (2022). The role of minerals in the optimal functioning of the immune system. *Nutrients*, 14 (3), 644. <https://doi.org/10.3390/nu14030644>
23. Xiong, Y., Cui, B., He, Z., Liu, S., Wu, Q., Yi, H., Zhao, F., Jiang, Z., Hu, S., & Wang, L. (2023). Dietary replacement of inorganic trace minerals with lower levels of organic trace minerals leads to enhanced antioxidant capacity, nutrient digestibility, and reduced fecal mineral excretion in growing-finishing pigs. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1142054. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1142054>

ORCID

- P. Khymynets  <https://orcid.org/0009-0000-6249-1026>
- V. Karpovskyi  <https://orcid.org/0009-0003-9848-1411>
- O. Zhurenko  <https://orcid.org/0000-0002-4933-0372>
- R. Nahorets  <https://orcid.org/0009-0003-8523-6687>
- R. Grelya  <https://orcid.org/0009-0008-2320-6921>
- I. Hryshchuk  <https://orcid.org/0000-0003-2571-6876>
- P. Karpovskyi  <https://orcid.org/0009-0002-8113-423X>
- O. Kovalchuk  <https://orcid.org/0009-0007-2365-3142>



2026 by the author(s). This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.