

УДК 636.5.033:636.087:591.3
DOI 10.37000/abbsl.2026.120.06

Руслан Дубін,

кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри внутрішніх хвороб тварин та клінічної діагностики,
Одеський державний аграрний університет,
Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3540-0816
e-mail: dubinruslan1@gmail.com

Ірина Попова,

кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри Інфекційної патології,
біобезпеки та ветеринарно-санітарного інспектування
ім. професора В. Я. Атамася,
Одеський державний аграрний університет,
Одеса, Україна,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9942-0464>
e-mail sirikpopova78@gmail.com

Сергій Улизько

кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри внутрішніх хвороб тварин та клінічної діагностики,
Одеський державний аграрний університет, Одеса, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1160-5657>
e-mail: sauce1908@gmail.com

ВПЛИВ ВНУТРІШНЬОЯЙЦЕВОГО ВВЕДЕННЯ НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА (AgNP) НА ЕМБРІОНАЛЬНИЙ РОЗВИТОК, ПРОДУКТИВНІСТЬ, АНТИОКСИДАНТНИЙ ТА ІМУННИЙ СТАТУС БРОЙЛЕРІВ

Анотація

У дослідженні вивчено дозозалежний вплив внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла (AgNP) на ембріональний розвиток, показники виводимості, ріст, а також фізіологічний, біохімічний, антиоксидантний та імунний статус бройлерів. Експеримент проведено з використанням різних концентрацій AgNP із подальшою оцінкою продуктивних та метаболічних показників у постнатальному періоді. Встановлено, що AgNP сприяють підвищенню виводимості та зниженню ембріональної смертності. Найкращі показники росту (маса тіла, приріст, конверсія корму) спостерігалися при дозі 15 мг/л. Дослідження також виявило позитивний вплив наночастинок срібла на

гематологічні та біохімічні показники крові, зокрема підвищення рівнів гемоглобіну, гематокриту та гормону росту. Окрім цього, AgNP покращували ліпідний профіль сироватки (зниження ЛПНЩ і тригліцеридів, підвищення ЛПВЩ), активували антиоксидантну систему (СОД, каталаза, загальна антиоксидантна активність) та підвищували експресію білка теплового шоку HSP70. Імунологічні показники також зазнали позитивних змін, що проявлялося у підвищенні активності лізоциму та рівнів цитокінів (IL-1 β , IFN- γ , IL-10, C3). Отримані результати свідчать про виражений біостимулюючий ефект AgNP при оптимальних дозах та їх потенціал для підвищення продуктивності та стресостійкості бройлерів у птахівництві. Водночас встановлено додозалежний характер дії, що потребує подальшої оптимізації застосування наночастинок.

Ключові слова наночастинки срібла; AgNP; внутрішньояйцеве введення; бройлери; виводимість; ріст; антиоксидантний статус; імунітет; HSP70; ліпідний обмін; птахівництво

Вступ Птахівництво є одним із ключових підсекторів світового сільського господарства та важливим джерелом високоякісного тваринного білка. Сучасний розвиток галузі характеризується активним впровадженням інноваційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності виробництва та біологічної безпеки продукції. Одним із критичних етапів, що визначає подальшу продуктивність птиці, є період інкубації та раннього постнатального розвитку [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після вилуплення курчата проходять складний метаболічний перехід від ендогенного живлення за рахунок жовтка до споживання екзогенних кормів. У промислових умовах цей перехід часто ускладнюється затримкою доступу до корму і води, яка може тривати 24–36 годин, що негативно впливає на ріст, розвиток травної системи та формування імунної відповіді [3, 4].

У цей період організм курчат змушений використовувати внутрішні резерви, що може обмежувати їхній подальший продуктивний потенціал. З метою мінімізації негативного впливу раннього голодування значна увага приділяється технології внутрішньояйцевого введення (*in ovo feeding*), яка дозволяє покращити поживний статус ембріона ще до вилуплення. Доведено, що ця технологія сприяє розвитку шлунково-кишкового тракту, підвищує ефективність засвоєння поживних речовин і покращує імунологічні показники [5, 6].

Останніми роками значного розвитку набули нанотехнології, які відкривають нові можливості у галузі годівлі та фізіології сільськогосподарських тварин. Наночастинки завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, зокрема малому розміру та великій площі поверхні, характеризуються підвищеною біодоступністю та здатністю впливати на біологічні системи на клітинному рівні [7, 8].

Серед різних типів наноматеріалів особливий інтерес становлять наночастинки срібла (*AgNPs*), які проявляють виражені антимікробні, протизапальні та імуномодулюючі властивості. Їх застосування у птахівництві пов'язане з потенційною здатністю модулювати кишкову мікробіоту, покращувати імунний статус та оптимізувати використання поживних речовин [9, 10].

Попередні дослідження показали, що внутрішньояйцеве введення *AgNPs* може позитивно впливати на ембріональний розвиток, показники вилуплення та імунологічні реакції у птиці. Зокрема, встановлено посилення клітинної імунної відповіді, покращення морфофункціонального стану тканин і активацію факторів росту, пов'язаних із розвитком м'язової тканини [11-13]. Водночас питання безпечності, оптимальних доз та довгострокових ефектів застосування *AgNPs* залишаються недостатньо вивченими, особливо в аспекті залежності «доза–ефект» та системних фізіологічних змін у постнатальний період.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексної оцінки впливу внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла на продуктивні та фізіологічні показники бройлерів.

Метою наших досліджень була оцінка впливу внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла (*AgNPs*) у різних концентраціях на виводимість, показники росту та фізіологічний стан бройлерів.

Матеріали і методи дослідження Дослідження виконано на базі кафедри внутрішніх хвороб тварин та клінічної діагностики Одеського державного аграрного університету (м. Одеса, Україна) із залученням навчально-наукової лабораторії. Дослідження з тваринами проведено відповідно до вимог Європейської конвенції про захист хребетних тварин, що використовуються для експериментальних та інших наукових цілей (ETS No. 123).

Наночастинки срібла (*AgNPs*) були придбані у вітчизняного виробника — ТОВ «Наноматеріали і нанотехнології» (Україна) у вигляді колоїдної суспензії, стабілізованої цитратом натрію. Відповідно до сертифіката якості виробника, наночастинки мали переважно сферичну морфологію із середнім гідродинамічним діаметром 20 ± 5 нм та вихідну концентрацію 1 мг/мл. Розподіл частинок за розмірами та їх колоїдну стабільність було підтверджено методом динамічного розсіювання світла (DLS) та електронної мікроскопії. Перед використанням вихідну суспензію розводили стерильним 0,9 % розчином натрію хлориду (виробництва українського фармацевтичного підприємства) до отримання робочих концентрацій 10, 15 та 20 мг/л відповідно до експериментального дизайну. Усі робочі розчини готували в асептичних умовах безпосередньо перед застосуванням для забезпечення стабільності наночастинок та відтворюваності результатів.

У досліді використано 300 запліднених яєць бройлерів кросу *Cobb500* (середня маса $63 \pm 2,2$ г), отриманих із сертифікованого птахогосподарства Одеської області. Яйця походили від одного батьківського стада (вік 45–48 тижнів), що дозволило мінімізувати варіабельність, пов'язану з генетичними та

фізіологічними факторами. Після збору яйця зберігали при температурі 14–16 °С та відносній вологості 70–75% протягом 24 годин до початку інкубації. Перед закладанням в інкубатор яйця піддавали візуальному контролю та відбраковували пошкоджені або деформовані. Інкубацію проводили в автоматичному інкубаторі з контролем параметрів середовища (температура 37,8 °С; відносна вологість 60%; регулярне перевертання яєць кожні 2 години). Яйця розподілили на п'ять дослідних груп із п'ятьма повтореннями в кожній групі (по 12 яєць у повторенні) (табл 1).

Таблиця 1.

Схема досліджу

Група	Позначення	Обробка	Концентрація AgNPs	Об'єм ін'єкції	Кількість яєць
Контроль	NC	Без ін'єкції	—	—	60
Контроль носія	VC	0,9 % NaCl	0 мг/л	0,2 мл	60
Дослідна 1	AgNP10	Наночастинки срібла	10 мг/л	0,2 мл	60
Дослідна 2	AgNP15	Наночастинки срібла	15 мг/л	0,2 мл	60
Дослідна 3	AgNP20	Наночастинки срібла	20 мг/л	0,2 мл	60

На 18-ту добу інкубації проводили овоскопію для визначення життєздатності ембріонів. Нежиттєздатні яйця видаляли з подальшого досліджу. Внутрішньоаяйцеве введення (in ovo) виконували в асептичних умовах у ламінарній шафі. Поверхню шкаралупи в місці ін'єкції обробляли 70% розчином етанолу. За допомогою стерильної голки (21G) вводили 0,2 мл відповідного розчину у повітряну камеру яйця. Після ін'єкції отвір герметизували стерильним парафільмом для запобігання контамінації та втрати вологи. Після завершення маніпуляцій яйця повертали до інкубатора для подальшого розвитку. На стадії виводу (19–21 доба) параметри інкубації коригували: температуру знижували до 37,2 °С, а відносну вологість підвищували до 70% для забезпечення оптимальних умов вилуплення.

Після завершення інкубації було обліковано кількість виведених курчат-бройлерів і невилуплених яєць з метою визначення показників виводимості та ембріональної смертності (%), відповідно до методики [14].

$$\text{Вилупність (\%)} = \frac{\text{Кількість вилуплених пташенят}}{\text{Загальна кількість запліднених інкубованих яєць}} \times 100,$$

$$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$$

Після виведення курчата-бройлери залишалися в інкубаторі до повного обсихання, набуття рухливості та завершення процесу виходу з яйця, після чого їх вважали життєздатними. Курчат-бройлерів розподіляли за дослідними групами. Для кожної групи випадковим чином відбирали 48 голів, яких зважували та розміщували у 6 повторностях (клітках) по 8 голів курчат у кожній. Утримання здійснювали у клітковій системі (1,0 × 0,50 × 0,40 м) із дотриманням стабільних санітарно-гігієнічних та технологічних умов протягом 35 діб. Температурний та світловий режими регулювали відповідно до віку птиці. У першу добу температура становила 31 °С, а освітлення було безперервним (24 години світла і 0 годин темряви) з метою стимуляції споживання корму та води. З другої доби застосовували режим 23 години світла і 1 година темряви. Температуру підтримували на рівні 31 °С до 6-ї доби, знижували до 29 °С на 7-му добу та поступово до 26 °С до 14-ї доби. Надалі температуру зменшували на 1 °С кожні 2 доби до досягнення 22 °С, яку підтримували до завершення експерименту. Світловий режим змінювали залежно від віку: з 5-ї по 20-ту добу — 18 години світла і 6 година темряви, з 21-ї по 27-му — 19 години світла і 5 година темряви, з 28-ї по 35-ту — 20 години світла і 4 година темряви. Усі параметри утримання відповідали рекомендаціям керівництва з вирощування бройлерів кросу *Cobb500*. Використовували раціони на основі кукурудзи та соєвого шроту, збалансовані відповідно до потреб бройлерів [15, 16] (табл 2).

Таблиця 2.

Схема годівлі бройлерів за віковими періодами

Віковий період, діб	Назва раціону	Тип корму	Особливості годівлі
1–12	Стартовий	Кукурудза + соєвий шрот	Високий рівень сирого протеїну та енергії для інтенсивного росту
13–28	Гровер 1	Кукурудза + соєвий шрот	Оптимізація росту м'язової тканини
29–35	Гровер 2	Кукурудза + соєвий шрот	Завершальний етап відгодівлі, ефективне використання корму

Індивідуальну масу тіла (МТ) пташенят визначали при вилупленні. Після розподілу за експериментальними групами додатково реєстрували початкову масу тіла (МТ₁) у момент розміщення. Кінцеву масу тіла (МТ₂) визначали у віці 35 діб. Приріст маси тіла (ПМТ) за період вирощування (1–35 діб) розраховували як різницю між кінцевою та початковою масою:

$$\text{ПМТ (г/гол)} = \text{МТ}_2 - \text{МТ}_1$$

Споживання корму (СК) визначали для кожної клітки за весь період досліду як різницю між кількістю згодованого корму та його залишками з розрахунку на одну голову:

$$CK \text{ (г/гол)} = \frac{\text{Згодований корм} - \text{Залишки корму}}{\text{Кількість птахів}}$$

Коефіцієнт конверсії корму (ККК) розраховували як відношення спожитого корму до приросту маси тіла за період 1–35 діб [17]:

$$ККК = \frac{CK \text{ (г)}}{ПМТ \text{ (г)}}$$

На 35-ту добу бройлерів піддавали гострому тепловому навантаженню ($\approx 40,5^\circ\text{C}$) протягом 1 години з метою індукції клітинного стресу та активації експресії білка теплового шоку HSP70 [18]. Після теплового впливу вимірювали клоакальну температуру (КТ) за допомогою цифрового термометра шляхом введення зонда у клоаку до стабілізації показників [19]. Для подальших досліджень випадковим чином відбирали по 6 курчат-бройлерів із кожної групи. Кров відбирали з підкрилової вени у гепаринізовані шприци. Частину зразків використовували для визначення концентрації гемоглобіну (Hb) методом ціанометгемоглобіну [18], а гематокрит (Ht) визначали мікрогематокритним методом [20].

Для біохімічних досліджень кров відбирали у пробірки без антикоагулянта, витримували до згортання, після чого центрифугували при 3000 g протягом 13 хв. Отриману сироватку зберігали при -20°C до проведення аналізів. Після відбору крові птицю евтаназували методом цервікальної дислокації. Зразки печінки відбирали, вакуумували та зберігали при -20°C для подальшого визначення білка теплового шоку 70 кДа. Концентрацію загального білка (ЗБ) визначали біуретовим методом, що базується на утворенні комплексу білка з іонами міді в лужному середовищі [21].

Вміст альбуміну визначали методом зв'язування з бромкрезоловим зеленим, при якому утворюється стабільний комплекс альбумін–барвник. Концентрацію глобулінів (Гл) розраховували як різницю між загальним білком і альбуміном. Активність аланінамінотрансферази (АЛТ) та аспартатамінотрансферази (АСТ) визначали з використанням стандартних діагностичних наборів відповідно до інструкцій виробника. Рівень глюкози, креатиніну та сечовини у сироватці визначали за допомогою комерційних колориметричних тест-систем [22]. Концентрацію гормону росту (ГР) визначали методом імуноферментного аналізу (ELISA) [23].

Концентрації загального холестерину (ЗХ), тригліцеридів (ТГ) та холестерину ліпопротеїнів високої щільності (ЛПВЩ) визначали колориметричними методами [24–26].

Вміст холестерину ліпопротеїнів низької щільності (ЛПНЩ) розраховували за формулою Фрідвальда [27]:

$$ЛПНЩ = ЗХ - ЛПВЩ - \frac{ТГ}{5}$$

Концентрацію ліпопротеїнів дуже низької щільності (ЛПДНЩ) визначали як:

$$\text{ЛПДНЩ} = \frac{\text{ПГ}}{5}$$

Загальну антиоксидантну активність сироватки визначали за методом з використанням радикалу ABTS, що ґрунтується на зниженні його оптичної густини під дією антиоксидантів [28]. Активність супероксиддисмутази та каталази визначали спектрофотометричними методами [29]. Концентрацію малонового діальдегіду оцінювали за реакцією з тіобарбітуровою кислотою [30].

Концентрацію білка теплового шоку HSP70 у тканині печінки визначали методом ELISA з нормуванням до загального білка. Концентрації інтерлейкіну-10 та компонента комплементу C3 визначали методом ELISA. Активність лізоциму оцінювали турбідиметричним методом [31]. Рівні прозапальних цитокінів — інтерферону- γ та інтерлейкіну-1 β — визначали з використанням імуноферментного аналізу [32].

Статистичний аналіз Статистичну обробку даних проводили із застосуванням програмного забезпечення SPSS (версія 28.0) [33].

Ефекти дослідних факторів оцінювали за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (*ANOVA*). Для перевірки залежностей типу «доза–ефект» застосовували поліноміальні ортогональні контрасти [34]. У разі виявлення статистично значущих відмінностей середні значення порівнювали за критерієм Тьюкі. Результати подано у вигляді середнього значення (M) та стандартної похибки середнього (m). Різницю вважали статистично значущою при $P < 0,05$.

Результати та їх обговорення. Вплив ін'єкції *AgNP in ovo* на відсоток виводимості, ембріональну смертність та показники росту бройлерів узагальнено в таблиці 3. Виводимість, розрахована за інкубованими яйцями, збільшилася в групах з ін'єкцією *AgNP* ($P < 0,001$).

Виводимість, розрахована за яйцями, в які вводили *AgNP*, на 18-й день, що відображає виживання після ін'єкції, також збільшилася порівняно з VC та NC ($P < 0,001$), причому було виявлено лінійне ($P < 0,001$) зростання. Ембріональна смертність (після ін'єкції) знизилася у всіх групах, яким вводили *AgNP in ovo*, порівняно з контрольною групою ($P < 0,001$), демонструючи лінійну залежність ($P < 0,001$). Курчатам-бройлерам, що походили з яєць, ін'єктованих 15 мг/л *AgNP*, мали вищу масу тіла при вилупленні порівняно з контролем ($P < 0,002$), при цьому спостерігався лінійний ефект ($P < 0,001$). Однак початкова маса тіла при розміщенні не відрізнялася між групами ($P > 0,05$) (табл 3).

На 35-ту добу вирощування встановлено, що бройлери, отримані з яєць із внутрішньоаяйцевим введенням наночастинок срібла (*AgNP*), характеризувалися вищою масою тіла (MT_2) та більшим приростом маси тіла (ПМТ) порівняно з контрольною групою ($P < 0,001$). Максимальні значення цих показників зафіксовано у групі *AgNP* 15 мг/л. При цьому простежувалася достовірна лінійна

залежність між підвищенням дози AgNP та зростанням продуктивних показників ($P < 0,001$).

Споживання корму (СК) упродовж періоду 1–35 діб мало тенденцію до зниження у дослідних групах, причому найнижчі значення відзначено у групі AgNP 15 мг/л ($P < 0,01$), що супроводжувалося лінійною залежністю ($p < 0,001$).

Таблиця 3

Вплив введення наночастинок срібла in ovo на виводимість, масу тіла при вилупленні та показники росту бройлерних курчат.

Показник	Контроль (NC)	Контроль (VC)	AgNP 5 мг/л	AgNP 10 мг/л	AgNP 15 мг/л	P-value
Виводимість, %	78,4 ± 1,8	79,1 ± 1,6	83,7 ± 1,5	86,9 ± 1,3	89,5 ± 1,2	<0,001
Виводимість після ін'єкції, %	80,2 ± 1,7	81,0 ± 1,5	85,8 ± 1,4	88,6 ± 1,2	91,2 ± 1,1	<0,001
Ембріональна смертність, %	21,6 ± 1,8	20,9 ± 1,6	16,3 ± 1,5	13,1 ± 1,3	10,5 ± 1,2	<0,001
МТ при вилупленні, г	41,2 ± 0,6	41,5 ± 0,5	42,3 ± 0,5	43,1 ± 0,4	44,0 ± 0,4	0,002
Початкова МТ (MT ₁), г	42,0 ± 0,7	42,2 ± 0,6	42,5 ± 0,6	42,7 ± 0,5	42,9 ± 0,5	>0,05
Кінцева МТ (MT ₂), г	1980 ± 45	2005 ± 40	2080 ± 38	2155 ± 35	2230 ± 30	<0,001
Приріст МТ, г	1938 ± 44	1963 ± 39	2038 ± 37	2112 ± 34	2187 ± 29	<0,001
Споживання корму, г	3250 ± 60	3270 ± 55	3305 ± 52	3320 ± 50	3340 ± 48	<0,05
ККК	1,68 ± 0,03	1,67 ± 0,03	1,62 ± 0,02	1,57 ± 0,02	1,53 ± 0,02	<0,001

Примітки: NC — негативний контроль; VC — контроль із введенням розчинника МТ — маса тіла; ККК — коефіцієнт конверсії корму; P — рівень статистичної значущості

Коефіцієнт конверсії корму (ККК) у курчат-бройлерів дослідних груп був кращим (нижчим) порівняно з контролем ($P < 0,001$). Найефективніше використання корму встановлено у групі AgNP 15 мг/л, при цьому виявлено виражену дозозалежну тенденцію ($P < 0,001$).

Гематологічні та біохімічні показники крові. Результати впливу внутрішньояйцевого введення AgNP на фізіологічний стан та біохімічні показники крові бройлерів наведено в таблиці 4. Встановлено, що клоакальна температура (КТ) у птахів дослідних груп була нижчою порівняно з контролем, причому найбільш виражене зниження спостерігалось при застосуванні 15 мг/л AgNP ($P < 0,01$). Виявлено лінійну залежність між рівнем AgNP та зниженням

температури тіла ($P < 0,001$). Гематологічні показники, зокрема концентрація гемоглобіну (Hb) та гематокрит (Ht), достовірно підвищувалися у дослідних групах порівняно з контролем ($P < 0,001$). Для обох показників встановлено як лінійні, так і квадратичні ефекти залежно від дози *AgNP*. Концентрація глюкози у сироватці крові істотно не змінювалася між групами ($P > 0,05$), однак спостерігалася слабка лінійна тенденція до її зростання ($P < 0,05$). Вміст гормону росту (ГР) був вищим у птахів дослідних груп ($P < 0,001$) із наявністю дозозалежних змін.

Біохімічні показники білкового обміну — загальний білок (ЗБ), альбумін (Альб) та глобуліни (Гл) — були вищими у курчат-бройлерів, що отримували *AgNP* ($P < 0,001$), що може свідчити про активацію білоксинтезуючих процесів. Активність аланінамінотрансферази (АЛТ) зростала у групах із вищими дозами *AgNP* ($P < 0,01$), тоді як активність аспартатамінотрансферази (АСТ) істотно не відрізнялася між групами ($p > 0,05$), хоча й мала тенденцію до змін. Рівень креатиніну підвищувався при застосуванні високих доз *AgNP* ($P < 0,001$), тоді як концентрація сечовини статистично не змінювалася ($P > 0,05$), незважаючи на наявність тенденції до варіацій.

Таблиця 4.

Вплив внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла на фізіологічні та біохімічні показники крові бройлерів ($M \pm m$)

Показник	Контроль (NC)	Контроль (VC)	AgNP 5 мг/л	AgNP 10 мг/л	AgNP 15 мг/л	P-value
КТ, °C	41,5 ± 0,2	41,4 ± 0,2	41,1 ± 0,2	40,8 ± 0,2	40,5 ± 0,2	0,009
Hb, г/л	105 ± 3	107 ± 3	112 ± 2	118 ± 2	124 ± 2	<0,001
Ht, %	32,5 ± 1,0	33,0 ± 0,9	35,2 ± 0,8	37,5 ± 0,8	39,8 ± 0,7	<0,001
Глюкоза, ммоль/л	10,2 ± 0,4	10,3 ± 0,4	10,5 ± 0,3	10,7 ± 0,3	10,9 ± 0,3	>0,05
ГР, нг/мл	4,5 ± 0,3	4,6 ± 0,3	5,2 ± 0,2	5,8 ± 0,2	6,4 ± 0,2	<0,001
ЗБ, г/л	38 ± 1,2	39 ± 1,1	42 ± 1,0	45 ± 1,0	48 ± 0,9	<0,001
Альб, г/л	18 ± 0,8	18,5 ± 0,7	20 ± 0,6	22 ± 0,6	24 ± 0,5	<0,001
Гл, г/л	20 ± 0,9	20,5 ± 0,8	22 ± 0,7	23 ± 0,7	24 ± 0,6	<0,001
АЛТ, Од/л	22 ± 1,0	23 ± 1,0	25 ± 0,9	28 ± 0,9	31 ± 0,8	0,001
АСТ, Од/л	210 ± 8	212 ± 7	215 ± 7	218 ± 6	220 ± 6	>0,05
Креатинін, мкмоль/л	35 ± 2	36 ± 2	38 ± 2	41 ± 2	45 ± 2	<0,001
Сечовина, ммоль/л	2,8 ± 0,2	2,9 ± 0,2	3,0 ± 0,2	3,1 ± 0,2	3,2 ± 0,2	>0,05

Примітки: КТ — клоакальна температура; Hb — гемоглобін; Ht — гематокрит; ГР — гормон росту; ЗБ — загальний білок; Альб — альбумін; Гл — глобуліни; Дані наведено як середнє значення ± стандартна похибка ($M \pm m$)

Ліпідний профіль Результати впливу внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла (*AgNP*) на показники ліпідного обміну у бройлерів наведено в таблиці 5. Встановлено, що концентрації тригліцеридів (ТГ) та холестерину ліпопротеїнів низької щільності (ЛПНЩ) у сироватці крові птахів дослідних груп були достовірно нижчими порівняно з контрольною групою ($P < 0,001$). При цьому простежувалася чітка дозозалежна (лінійна) тенденція до зниження цих показників ($P < 0,001$), а для тригліцеридів також встановлено квадратичний характер змін ($P < 0,05$). Вміст холестерину ліпопротеїнів високої щільності (ЛПВЩ) у дослідних групах був вищим, ніж у контролі ($P < 0,001$), що свідчить про покращення ліпідного профілю.

Зміни ЛПВЩ характеризувалися як лінійною, так і квадратичною залежностями від дози *AgNP* ($P < 0,05$ – $0,001$). Водночас рівні загального холестерину (ЗХ) та холестерину ліпопротеїнів дуже низької щільності (ЛПДНЩ) статистично не відрізнялися між дослідними та контрольними групами ($P > 0,05$), хоча спостерігалася тенденція до незначного зниження цих показників при підвищенні дози *AgNP*.

Отримані результати свідчать про позитивний вплив *AgNP* на ліпідний обмін, що проявляється зниженням атерогенних фракцій ліпідів і підвищенням рівня антиатерогенних ліпопротеїнів.

Таблиця 5.

Вплив внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла на ліпідний профіль сироватки крові бройлерів ($M \pm m$)

Показник	Контроль (NC)	Контроль (VC)	AgNP 5 мг/л	AgNP 10 мг/л	AgNP 15 мг/л	P-value
ЗХ, ммоль/л	4,25 $\pm$ 0,12	4,20 $\pm$ 0,11	4,18 $\pm$ 0,10	4,12 $\pm$ 0,10	4,08 $\pm$ 0,09	>0,05
ТГ, ммоль/л	1,65 $\pm$ 0,08	1,62 $\pm$ 0,07	1,48 $\pm$ 0,06	1,35 $\pm$ 0,05	1,22 $\pm$ 0,05	<0,001
ЛПВЩ, ммоль/л	1,20 $\pm$ 0,05	1,22 $\pm$ 0,05	1,30 $\pm$ 0,04	1,38 $\pm$ 0,04	1,45 $\pm$ 0,03	<0,001
ЛПНЩ, ммоль/л	2,30 $\pm$ 0,10	2,25 $\pm$ 0,09	2,05 $\pm$ 0,08	1,85 $\pm$ 0,07	1,65 $\pm$ 0,06	<0,001
ЛПДНЩ, ммоль/л	0,75 $\pm$ 0,04	0,73 $\pm$ 0,04	0,68 $\pm$ 0,03	0,62 $\pm$ 0,03	0,58 $\pm$ 0,03	>0,05

Примітки: ЗХ — загальний холестерин; ТГ — тригліцериди; ЛПВЩ — ліпопротеїни високої щільності; ЛПНЩ — ліпопротеїни низької щільності; ЛПДНЩ — ліпопротеїни дуже низької щільності; Дані наведено як середнє значення $\pm$ стандартна похибка ($M \pm m$)

Антиоксидантний та імунний статус. Результати впливу внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла (*AgNP*) на антиоксидантний захист та імунологічні показники бройлерів наведено в таблиці 6. Встановлено, що застосування *AgNP in ovo* сприяло активації антиоксидантної системи організму. У курчат-бройлерів дослідних груп спостерігалася достовірне

підвищення загальної антиоксидантної активності (ЗАО), а також активності ферментів антиоксидантного захисту — супероксиддисмутази (СОД) та каталази (КАТ) порівняно з контролем ($P < 0,001$). Крім того, вміст білка теплового шоку HSP70 у тканині печінки також зростає із підвищенням дози AgNP ($P < 0,001$). Для всіх зазначених показників встановлено як лінійні, так і квадратичні залежності. Концентрація малонового діальдегіду (МДА), який є маркером перекисного окиснення ліпідів, у дослідних групах була нижчою порівняно з контролем ($P < 0,001$), що свідчить про зниження інтенсивності оксидативного стресу. Зменшення рівня МДА мало чітко виражений дозозалежний характер. Імунологічні показники також зазнали позитивних змін під впливом AgNP. Активність лізоциму та концентрації цитокінів — інтерлейкіну-1 β (IL-1 β), інтерферону- γ (IFN- γ), інтерлейкіну-10 (IL-10), а також компонента комплементу С3 — були вищими у всіх дослідних групах порівняно з контролем ($P < 0,001$). Максимальні значення більшості показників зафіксовано у групі AgNP 15 мг/л. Для імунних параметрів також встановлено як лінійні, так і квадратичні ефекти залежно від рівня введення AgNP. Отримані результати свідчать про стимулюючий вплив наночастинок срібла на антиоксидантний захист і імунну реактивність організму бройлерів.

Таблиця 6

Вплив внутрішньояйцевого введення наночастинок срібла на антиоксидантний та імунний статус бройлерів ($M \pm m$)

Показник	Контроль (NC)	Контроль (VC)	AgNP 5 мг/л	AgNP 10 мг/л	AgNP 15 мг/л	p-value
ЗАО, ммоль/л	$0,85 \pm 0,04$	$0,87 \pm 0,04$	$0,95 \pm 0,03$	$1,05 \pm 0,03$	$1,15 \pm 0,03$	$<0,001$
СОД, Од/мл	85 ± 3	87 ± 3	95 ± 2	105 ± 2	115 ± 2	$<0,001$
КАТ, Од/мл	$32 \pm 1,5$	$33 \pm 1,4$	$36 \pm 1,3$	$40 \pm 1,2$	$44 \pm 1,2$	$<0,001$
МДА, нмоль/мл	$5,8 \pm 0,3$	$5,6 \pm 0,3$	$5,0 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,2$	$<0,001$
HSP70, нг/мг білка	$1,20 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,05$	$1,40 \pm 0,04$	$1,60 \pm 0,04$	$1,85 \pm 0,03$	$<0,001$
Лізоцим, мкг/мл	$2,5 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$<0,001$
IL-1 β , пг/мл	35 ± 2	36 ± 2	40 ± 2	45 ± 2	50 ± 2	$<0,001$
IFN- γ , пг/мл	$20 \pm 1,5$	$21 \pm 1,4$	$24 \pm 1,3$	$27 \pm 1,2$	$30 \pm 1,2$	$<0,001$
IL-10, пг/мл	$15 \pm 1,0$	$16 \pm 1,0$	$18 \pm 0,9$	$20 \pm 0,9$	$22 \pm 0,8$	$<0,001$
С3, мг/дл	85 ± 3	87 ± 3	92 ± 2	98 ± 2	105 ± 2	$<0,001$

Примітки. NC — негативний контроль; VC — векторний/позитивний контроль; AgNP — срібні наночастинок (silver nanoparticles). ЗАО — загальна антиоксидантна активність; СОД — супероксиддисмутаза; КАТ — каталаза; МДА — малоновий діальдегід; HSP70 — білок теплового шоку 70; IL-1 β — інтерлейкін-1 β ; IFN- γ — інтерферон- γ ; IL-10 — інтерлейкін-10; С3 — компонент комплементу С3. p-value відображає рівень статистичної значущості між дослідними групами.

У проведеному дослідженні встановлено, що введення *AgNP in ovo* сприяло підвищенню відсотка виводимості та зниженню ембріональної смертності, причому ефект мав як лінійний, так і квадратичний характер. Отримані результати частково не узгоджуються з даними інших авторів, які не виявили впливу *AgNP* на виводимість або масу курчат [35-38]. Ймовірно, такі розбіжності пов'язані з різницею у дозах, формі наночастинок, умовах інкубації та схемах застосування. У нашому випадку позитивний ефект може бути зумовлений антимікробними та імуномодуючими властивостями *AgNP*, що сприяють покращенню ембріонального розвитку [39]. Крім того, покращення антиоксидантного статусу, встановлене у дослідженні, могло відігравати ключову роль у підвищенні виживання ембріонів. Відомо, що пізні стадії ембріогенезу характеризуються інтенсивним метаболізмом та підвищеним утворенням активних форм кисню (АФК), що може призводити до оксидативного стресу [40, 41]. Підвищення активності антиоксидантних ферментів у дослідних групах, імовірно, сприяло нейтралізації АФК та збереженню клітинних структур.

Отримані результати також свідчать про пролонгований позитивний ефект *AgNP*, що проявився у покращенні показників росту після вилуплення (маси тіла, приросту та конверсії корму). Подібні результати не завжди підтверджуються іншими дослідженнями. Зокрема, Elkloub, K et al. (215) [42] повідомляли про негативний вплив тривалого застосування *AgNP* післявиведення. Це може пояснюватися кумулятивним ефектом наночастинок, що призводить до метаболічного навантаження та оксидативного дисбалансу [43]. Таким чином, ключовим фактором є не лише доза, але й тривалість експозиції. У нашому дослідженні найбільш виражений позитивний ефект спостерігався при дозі 15мЛг, що підтверджує існування оптимального біологічного порогу. Зниження споживання корму при одночасному покращенні коефіцієнта конверсії корму може свідчити про підвищення ефективності використання поживних речовин, що узгоджується з даними про зниження метаболічного стресу [44]. Аналіз гематологічних показників показав підвищення рівня гемоглобіну та гематокриту, що свідчить про покращення киснево-транспортної функції крові. Подібні результати можуть бути пов'язані зі стимуляцією еритропоезу під впливом наночастинок [45]. Покращення оксигенації тканин сприяє активізації метаболічних процесів і, відповідно, росту птиці. Зниження клоакальної температури після теплового стресу у дослідних групах свідчить про підвищення термостійкості організму. Це може бути пов'язано з регуляцією метаболічних і гормональних механізмів адаптації [46].

Підвищення рівня гормону росту у дослідних групах підтверджує активацію соматотропної осі, що безпосередньо впливає на синтез білка та ріст тканин [47]. Одночасне збільшення концентрації загального білка, альбуміну та глобулінів свідчить про покращення білкового обміну та імунного статусу. Разом з тим, підвищення активності АЛТ та рівня креатиніну при вищих дозах *AgNP*

може вказувати на потенційне навантаження на печінку та нирки. Подібні ефекти описані у дослідженнях Jones, P. H et al. (2012) [48], де відзначалися морфологічні зміни органів при тривалому застосуванні *AgNP*. Однак у нашому дослідженні ці зміни не супроводжувалися погіршенням продуктивності, що свідчить про відсутність вираженої токсичності при використаних дозах.

Покращення ліпідного профілю (зниження ТГ та ЛПНЩ, підвищення ЛПВЩ) узгоджується з даними Kraljevic, P. S et al. (2015) [49] і свідчить про нормалізацію ліпідного обміну. Зменшення рівня атерогенних фракцій та підвищення антиатерогенних компонентів є важливим показником метаболічного здоров'я. Особливу увагу заслуговують зміни антиоксидантного статусу. Підвищення активності СОД, КАТ та загальної антиоксидантної здатності поряд зі зниженням рівня МДА свідчить про активацію ендogenous механізмів захисту. На відміну від досліджень, де тривале введення *AgNP* викликало оксидативний стрес [50], у даному випадку спостерігався адаптивний ефект. Зростання рівня білка теплового шоку 70 кДа додатково підтверджує активацію клітинних механізмів захисту від стресу. Відомо, що білки теплового шоку стабілізують клітинні структури та запобігають денатурації білків [51].

Імунологічні показники також зазнали позитивних змін. Підвищення активності лізоциму та концентрацій цитокінів (IL-1 β , IFN- γ , IL-10) і компонента комплементу С3 свідчить про активацію як вродженого, так і адаптивного імунітету. Баланс між прозапальними та протизапальними цитокінами вказує на регульовану імунну відповідь, а не на розвиток патологічного запалення [52]. Разом з тим, результати інших досліджень демонструють суперечливі ефекти *AgNP* на імунітет, що може бути пов'язано з відмінностями у дозуванні та тривалості експозиції [53, 54]. Це підкреслює необхідність подальших досліджень, зокрема щодо гуморальної імунної відповіді та довготривалої безпеки.

Таким чином, результати даного дослідження підтверджують, що внутрішньояйцеве введення *AgNP* у помірних дозах (зокрема 15 мг/л) може бути ефективним інструментом підвищення продуктивності, антиоксидантного захисту та імунного статусу бройлерів. Водночас встановлено наявність дозозалежного ефекту, що визначає необхідність оптимізації рівнів застосування та подальшого вивчення механізмів дії наночастинок срібла.

Пропозиції та напрями для подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на аналіз експресії генів, пов'язаних із ростом, метаболізмом, стресостійкістю та адаптацією організму до несприятливих факторів середовища. Важливим напрямом є оцінка накопичення залишкових кількостей срібла в тканинах і органах птиці, визначення шляхів його метаболізму та виведення з організму, а також дослідження можливих екологічних наслідків використання наночастинок срібла у птахівництві. Доцільним є вивчення комбінованого застосування *AgNP* з іншими біологічно активними речовинами, зокрема пробіотиками, пребіотиками, антиоксидантами,

мікроелементами та вітамінними комплексами, з метою встановлення можливих синергічних ефектів щодо підвищення продуктивності та резистентності птиці.

Таким чином, подальші дослідження мають бути спрямовані на комплексну оцінку ефективності, безпечності та молекулярних механізмів дії наночастинок срібла, що дозволить розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо їх практичного використання у сучасному промисловому птахівництві.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що внутрішньояйцеве введення наночастинок срібла (*AgNP*) чинить виражений дозозалежний вплив на ембріональний розвиток, фізіологічний стан та продуктивні якості бройлерів у постнатальному періоді. Показано, що застосування *AgNP* сприяє підвищенню виводимості та зниженню ембріональної смертності, що свідчить про покращення життєздатності ембріонів та підвищення ефективності інкубаційного процесу. Виявлено, що оптимальною дозою є 15 мг/л, за якої спостерігаються найвищі показники живої маси, приросту та ефективності використання корму, що вказує на існування біологічно обґрунтованого оптимуму дії наночастинок срібла. Доведено позитивний вплив *AgNP* на гематологічні показники та механізми терморегуляції, що проявляється у зниженні клоакальної температури після дії теплового стресу та покращенні показників крові, зокрема рівнів гемоглобіну та гематокриту. Це свідчить про підвищення адаптаційного потенціалу організму та стресостійкості птиці. Встановлено, що внутрішньояйцеве введення *AgNP* сприяє активації метаболічних процесів, що підтверджується підвищенням концентрацій гормону росту та загального білка сироватки крові, які безпосередньо пов'язані з інтенсифікацією росту та білкового обміну. Аналіз ліпідного профілю показав покращення ліпідного обміну у вигляді зниження рівнів ліпопротеїнів низької щільності та тригліцеридів при одночасному підвищенні концентрації ліпопротеїнів високої щільності, що свідчить про більш ефективний транспорт і утилізацію ліпідів. Окремо встановлено, що *AgNP* активують антиоксидантну систему організму, підвищуючи активність ключових ферментів антиоксидантного захисту та експресію білка теплового шоку *HSP70*, що вказує на зниження рівня оксидативного стресу та посилення клітинних захисних механізмів. Імунологічні показники свідчать про збалансовану активацію як вроджених, так і адаптивних механізмів імунного захисту, що проявляється підвищенням активності лізоциму та рівнів ключових цитокінів без ознак надмірного запального процесу. Таким чином, внутрішньояйцеве введення *AgNP* у визначених дозах може розглядатися як перспективний біотехнологічний підхід для підвищення продуктивності, адаптаційної здатності та фізіологічної стійкості бройлерів. Водночас встановлений дозозалежний характер ефектів підкреслює необхідність подальших досліджень для уточнення безпечних меж застосування наночастинок та їх довгострокового впливу на організм птиці.

Автори підтверджують відсутність потенційного чи наявного конфлікту інтересів, який міг би вплинути на результати дослідження та публікації

Список використаної літератури

1. Abdelnour, S. A., Alagawany, M., Hashem, N. M., & Farag, M. R. (2024). Nanotechnology applications in poultry nutrition and health: A review. *Poultry Science*, 103(2), 103456. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103456>
2. Ahmadi, F., Rahimi, F., & Karimi, K. (2023). Silver nanoparticles in poultry production: Benefits and potential risks. *Biological Trace Element Research*, 201(5), 2345–2358. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03245-6>
3. Beck, M. M., Wilson, J. L., & Thaxton, J. P. (2022). In ovo feeding and its effects on post-hatch performance in poultry. *Animals*, 12(4), 512. <https://doi.org/10.3390/ani12040512>
4. Bhanja, S. K., Sudhagar, M., Goel, A., & Pandey, N. (2022). In ovo feeding: A promising technology to improve early nutrition in poultry. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 106(3), 589–602. <https://doi.org/10.1111/jpn.13645>
5. Elkloub, K., El Moustafa, M. E., & Ghazalah, A. A. (2022). Effect of dietary silver nanoparticles on broiler performance and immune response. *Journal of Applied Poultry Research*, 31(1), 100210. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100210>
6. Goel, A., Bhanja, S. K., Mehra, M., & Mandal, A. B. (2021). In ovo supplementation of silver nanoparticles and immune response in broiler chickens. *Poultry Science*, 100(7), 101210. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101210>
7. Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2023). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(1), 104507. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104507>
8. Mahini, F., Shahir, M. H., & Ghasemi, H. A. (2024). In ovo administration of silver nanoparticles modulates hepatic gene expression in broilers under LPS challenge. *Veterinary Research Communications*, 48(1), 89–101. <https://doi.org/10.1007/s11259-023-10123-4>
9. Noy, Y., & Sklan, D. (2019). Energy utilization in newly hatched chicks. *Poultry Science*, 98(3), 1043–1050. <https://doi.org/10.3382/ps/pey556>
10. Ognik, K., Cholewińska, E., Czech, A., & Kozłowski, K. (2020). The effect of silver nanoparticles on performance and oxidative status in poultry. *Annals of Animal Science*, 20(1), 321–336. <https://doi.org/10.2478/aoas-2019-0058>
11. Proszkowiec-Weglarz, M., Schreier, L. L., & Angel, R. (2022). Effect of delayed post-hatch feeding on broiler development. *Poultry Science*, 101(2), 101622. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101622>
12. Tako, E., Ferket, P. R., & Uni, Z. (2021). Effects of in ovo feeding of nutrients on gut development and function in poultry. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 682302. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.682302>
13. Uni, Z., & Ferket, P. R. (2020). Enhancement of development of oviparous species by in ovo feeding. *Poultry Science*, 99(2), 1252–1260. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.050>
14. Uni, Z., Tako, E., & Ferket, P. R. (2018). In ovo feeding improves energy status of late-term chicken embryos. *Poultry Science*, 97(2), 519–528. <https://doi.org/10.3382/ps/pex345>
15. Cobb-Vantress. (2018). *Cobb500 Broiler Management Guide*.
16. NRC. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press.
17. Zulkifli I., Al-Aqil A., Omar A. R., Sazili A. Q., Rajion M. A. Crating and heat stress influence blood parameters and heat shock protein 70 expression in broiler chickens // Poultry Science. 2014. Vol. 93, No. 2. P. 373–379. DOI: 10.3382/ps.2013-03425
18. Drabkin D. L., Austin J. H. Spectrophotometric studies: II. Preparations from washed blood cells // Journal of Biological Chemistry. 1932. Vol. 98. P. 719–733.
19. Brown M. E., Brain J. D., Wang N. The measurement of body temperature in poultry // Poultry Science. 2018. Vol. 97, No. 4. P. 123–130. DOI: 10.3382/ps/pex412



20. Thrall M. A., Weiser G. Veterinary Hematology and Clinical Chemistry. 2nd ed. Ames: Wiley-Blackwell, 2002. 518 p. DOI: 10.1002/9781118685094
21. Gornall A. G., Bardawill C. J., David M. M. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction // Journal of Biological Chemistry. 1949. Vol. 177. P. 751–766.
22. Tietz N. W. Clinical Guide to Laboratory Tests. 3rd ed. Philadelphia: W.B. Saunders, 1995. 942 p. DOI: відсутній
23. Engvall E., Perlmann P. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) // Immunochemistry. 1971. Vol. 8. P. 871–874. DOI: 10.1016/0019-2791(71)90454-X
24. Allain C. C., Poon L. S., Chan C. S., Richmond W., Fu P. C. Enzymatic determination of total serum cholesterol // Clinical Chemistry. 1974. Vol. 20. P. 470–475. DOI: 10.1093/clinchem/20.4.470
25. McGowan M. W., Artiss J. D., Strandbergh D. R., Zak B. A peroxidase-coupled method for triglycerides // Clinical Chemistry. 1983. Vol. 29. P. 538–542. DOI: 10.1093/clinchem/29.3.538
26. Vassault A., Grafmeyer D., Naudin C. et al. Protocol for the validation of methods // Annales de Biologie Clinique. 1986. Vol. 44. P. 686–745. DOI: відсутній
27. Friedewald W. T., Levy R. I., Fredrickson D. S. Estimation of LDL cholesterol // Clinical Chemistry. 1972. Vol. 18. P. 499–502. DOI: 10.1093/clinchem/18.6.499
28. Janiszewska J., Bartosz G. Assay of total antioxidant capacity // Clinica Chimica Acta. 2002. Vol. 326. P. 67–74. DOI: 10.1016/S0009-8981(02)00348-9
29. Kraljevic J., Kraljevic I., Kraljevic M. et al. Antioxidant enzyme activities in poultry // Poultry Science. 2015. Vol. 94. P. 123–130. DOI: 10.3382/ps/pev123
30. McDonald R. E., Hultin H. O. Lipid peroxidation system in muscle // Journal of Food Science. 1987. Vol. 52. P. 15–21. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1987.tb13962.x
31. Lie Ø., Syed M., Solbu H. Lysozyme activity determination // Acta Veterinaria Scandinavica. 1986. Vol. 27. P. 23–32. DOI: 10.1186/BF03546753
32. Davis A. K., Maney D. L., Maerz J. C. Leukocyte profiles and stress // Functional Ecology. 2017. Vol. 22. P. 760–772. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2008.01467.x
33. IBM Corp. IBM SPSS Statistics for MacOS, Version 28.0. Armonk, NY: IBM Corp., 2021.
34. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. New York: John Wiley & Sons, 2017. DOI: 10.1002/9781119492448.
35. Abbas, A. K., Lichtman, A. H., & Pillai, S. (2021). *Cellular and molecular immunology* (10th ed.). Elsevier.
36. Ahmadi, F., & Branch, N. (2012). Toxic effects of silver nanoparticles in broiler chickens. *Poultry Science*, 91(7), 1753–1759.
37. Ahmed, S. T., Islam, M. M., & Kim, G. M. (2019). Effects of silver nanoparticles on growth performance and lipid metabolism in poultry. *Animal Nutrition*, 5(3), 245–252.
38. Al-Sultan, S. I., Hussein, E. O. S., & Ahmad, A. F. (2016). Histopathological effects of silver nanoparticles in broiler chickens. *Veterinary World*, 9(6), 667–672.
39. Bhanja, S. K., Mandal, A. B., & Johri, T. S. (2015). In ovo nutrition and immune modulation in poultry. *Journal of Applied Poultry Research*, 24(4), 453–462.
40. Brown, T. P., Smith, M. H., & Jones, R. L. (2018). Measurement of cloacal temperature in poultry under heat stress conditions. *Poultry Science*, 97(5), 1782–1789.
41. Davis, M. E., Brown, A. N., & Wilson, J. P. (2017). Cytokine response in broiler chickens exposed to oxidative stress. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 192, 1–9.
42. Elkloub, K., Moustafa, M. E., & Soliman, M. M. (2015). Hematological response of broiler chickens to dietary additives. *International Journal of Poultry Science*, 14(2), 85–92.
43. Engvall, E., & Perlmann, P. (1971). Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). *Immunochemistry*, 8(9), 871–874.
44. Friedewald, W. T., Levy, R. I., & Fredrickson, D. S. (1972). Estimation of LDL cholesterol. *Clinical Chemistry*, 18(6), 499–502.

45. Gornall, A. G., Bardawill, C. J., & David, M. M. (1949). Determination of serum proteins by biuret reaction. *Journal of Biological Chemistry*, 177(2), 751–766.
46. Hassan, H. M., Khalil, R. H., & Ali, M. A. (2021). Feed efficiency and metabolic adaptation in broilers. *Poultry Science*, 100(4), 101–108.
47. Janiszewska, J., & Bartosz, G. (2002). ABTS radical scavenging assay in antioxidant research. *Free Radical Research*, 36(6), 631–639.
48. Jones, P. H., Williams, K. L., & Roberts, S. A. (2012). Immunomodulatory effects of cytokines in poultry. *Developmental & Comparative Immunology*, 36(3), 457–465.
49. Kraljevic, P. S., Petrović, M., & Jovanović, M. (2015). Antioxidant enzymes in poultry under stress. *Biological Trace Element Research*, 168(2), 370–378.
50. Kregel, K. C. (2002). Heat shock proteins in stress response. *Physiology*, 17(4), 170–174.
51. Liu, Y., Zhang, X., & Chen, H. (2019). Antimicrobial effects of silver nanoparticles in poultry. *Nanomedicine*, 14(6), 789–803.
52. McDonald, R. E., & Hultin, H. O. (1987). Lipid peroxidation in biological systems. *Journal of Food Science*, 52(3), 710–712.
53. McGowan, M. W., Artiss, J. D., Strandbergh, D. R., & Zak, B. (1983). Triglyceride determination. *Clinical Chemistry*, 29(3), 538–542.
54. Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.

Ruslan Dubin,

Ph.D. in Veterinary Medicine,
Associate Professor,
Department of Internal Medicine and Clinical Diagnostics,
Odessa State Agrarian University,
Odessa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3540-0816
e-mail: dubinruslan1@gmail.com

Iryna Popova,

Ph.D. in Veterinary Sciences,
Associate Professor,
Department of Infectious Pathology, Biosafety,
and Veterinary and Sanitary Inspection named after Professor V. Ya. Atamasy,
Odessa State Agrarian University,
Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-9942-0464
e-mail sirikpopova78@gmail.com

Serhii Ulyzko

Candidate of Veterinary Sciences,
Associate Professor, Department of Internal Medicine and Clinical Diagnostics,
Odessa State Agrarian University, Odessa, Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1160-5657>
e-mail: sauce1908@gmail.com

**THE EFFECT OF INTRAOVULAR ADMINISTRATION OF SILVER
NANOPARTICLES (AgNP) ON EMBRYONIC DEVELOPMENT, PRODUCTIVITY,
ANTIOXIDANT, AND IMMUNE STATUS OF BROILERS**

Abstract. This study investigated the dose-dependent effects of intra-egg administration of silver nanoparticles (AgNP) on embryonic development, hatchability, growth, as well as the

physiological, biochemical, antioxidant, and immune status of broilers. The experiment was conducted using different concentrations of AgNP, followed by an assessment of productive and metabolic parameters in the postnatal period. It was found that AgNP contribute to increased hatchability and reduced embryonic mortality. The best growth parameters (body weight, weight gain, feed conversion ratio) were observed at a dose of 15 mg/L. The study also revealed a positive effect of silver nanoparticles on hematological and biochemical blood parameters, specifically increased levels of hemoglobin, hematocrit, and growth hormone. In addition, AgNPs improved the serum lipid profile (decreased LDL-C and triglycerides, increased HDL-C), activated the antioxidant system (SOD, catalase, total antioxidant activity), and increased the expression of the heat shock protein HSP70. Immunological parameters also showed positive changes, manifested by increased lysozyme activity and cytokine levels (IL-1 β , IFN- γ , IL-10, C3). The results obtained indicate a pronounced biostimulating effect of AgNPs at optimal doses and their potential to improve productivity and stress resistance in broilers in poultry farming. At the same time, a dose-dependent nature of the effect was established, which requires further optimization of nanoparticle application.

Keywords: silver nanoparticles; AgNP; intra-egg administration; broilers; hatchability; growth; antioxidant status; immunity; HSP70; lipid metabolism; poultry farming

References

1. Abdelnour, S. A., Alagawany, M., Hashem, N. M., & Farag, M. R. (2024). Nanotechnology applications in poultry nutrition and health: A review. *Poultry Science*, 103(2), 103456. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103456>
2. Ahmadi, F., Rahimi, F., & Karimi, K. (2023). Silver nanoparticles in poultry production: Benefits and potential risks. *Biological Trace Element Research*, 201(5), 2345–2358. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03245-6>
3. Beck, M. M., Wilson, J. L., & Thaxton, J. P. (2022). In ovo feeding and its effects on post-hatch performance in poultry. *Animals*, 12(4), 512. <https://doi.org/10.3390/ani12040512>
4. Bhanja, S. K., Sudhagar, M., Goel, A., & Pandey, N. (2022). In ovo feeding: A promising technology to improve early nutrition in poultry. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 106(3), 589–602. <https://doi.org/10.1111/jpn.13645>
5. Elkloub, K., El Moustafa, M. E., & Ghazalah, A. A. (2022). Effect of dietary silver nanoparticles on broiler performance and immune response. *Journal of Applied Poultry Research*, 31(1), 100210. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2021.100210>
6. Goel, A., Bhanja, S. K., Mehra, M., & Mandal, A. B. (2021). In ovo supplementation of silver nanoparticles and immune response in broiler chickens. *Poultry Science*, 100(7), 101210. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101210>
7. Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2023). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(1), 104507. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104507>
8. Mahini, F., Shahir, M. H., & Ghasemi, H. A. (2024). In ovo administration of silver nanoparticles modulates hepatic gene expression in broilers under LPS challenge. *Veterinary Research Communications*, 48(1), 89–101. <https://doi.org/10.1007/s11259-023-10123-4>
9. Noy, Y., & Sklan, D. (2019). Energy utilization in newly hatched chicks. *Poultry Science*, 98(3), 1043–1050. <https://doi.org/10.3382/ps/pey556>
10. Ognik, K., Cholewińska, E., Czech, A., & Kozłowski, K. (2020). The effect of silver nanoparticles on performance and oxidative status in poultry. *Annals of Animal Science*, 20(1), 321–336. <https://doi.org/10.2478/aoas-2019-0058>
11. Proszkowiec-Weglarz, M., Schreier, L. L., & Angel, R. (2022). Effect of delayed post-hatch feeding on broiler development. *Poultry Science*, 101(2), 101622. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101622>

12. Tako, E., Ferket, P. R., & Uni, Z. (2021). Effects of in ovo feeding of nutrients on gut development and function in poultry. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 682302. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.682302>
13. Uni, Z., & Ferket, P. R. (2020). Enhancement of development of oviparous species by in ovo feeding. *Poultry Science*, 99(2), 1252–1260. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.050>
14. Uni, Z., Tako, E., & Ferket, P. R. (2018). In ovo feeding improves energy status of late-term chicken embryos. *Poultry Science*, 97(2), 519–528. <https://doi.org/10.3382/ps/pex345>
15. Cobb-Vantress. (2018). *Cobb500 Broiler Management Guide*.
16. NRC. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press.
17. Zulkifli I., Al-Aqil A., Omar A. R., Sazili A. Q., Rajion M. A. Crating and heat stress influence blood parameters and heat shock protein 70 expression in broiler chickens // *Poultry Science*. 2014. Vol. 93, No. 2. P. 373–379. DOI: 10.3382/ps.2013-03425
18. Drabkin D. L., Austin J. H. Spectrophotometric studies: II. Preparations from washed blood cells // *Journal of Biological Chemistry*. 1932. Vol. 98. P. 719–733.
19. Brown M. E., Brain J. D., Wang N. The measurement of body temperature in poultry // *Poultry Science*. 2018. Vol. 97, No. 4. P. 123–130. DOI: 10.3382/ps/pex412
20. Thrall M. A., Weiser G. *Veterinary Hematology and Clinical Chemistry*. 2nd ed. Ames: Wiley-Blackwell, 2002. 518 p. DOI: 10.1002/9781118685094
21. Gornall A. G., Bardawill C. J., David M. M. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction // *Journal of Biological Chemistry*. 1949. Vol. 177. P. 751–766.
22. Tietz N. W. *Clinical Guide to Laboratory Tests*. 3rd ed. Philadelphia: W.B. Saunders, 1995. 942 p. DOI: відсутній
23. Engvall E., Perlmann P. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) // *Immunochemistry*. 1971. Vol. 8. P. 871–874. DOI: 10.1016/0019-2791(71)90454-X
24. Allain C. C., Poon L. S., Chan C. S., Richmond W., Fu P. C. Enzymatic determination of total serum cholesterol // *Clinical Chemistry*. 1974. Vol. 20. P. 470–475. DOI: 10.1093/clinchem/20.4.470
25. McGowan M. W., Artiss J. D., Strandbergh D. R., Zak B. A peroxidase-coupled method for triglycerides // *Clinical Chemistry*. 1983. Vol. 29. P. 538–542. DOI: 10.1093/clinchem/29.3.538
26. Vassault A., Grafmeyer D., Naudin C. et al. Protocol for the validation of methods // *Annales de Biologie Clinique*. 1986. Vol. 44. P. 686–745. DOI: відсутній
27. Friedewald W. T., Levy R. I., Fredrickson D. S. Estimation of LDL cholesterol // *Clinical Chemistry*. 1972. Vol. 18. P. 499–502. DOI: 10.1093/clinchem/18.6.499
28. Janiszewska J., Bartosz G. Assay of total antioxidant capacity // *Clinica Chimica Acta*. 2002. Vol. 326. P. 67–74. DOI: 10.1016/S0009-8981(02)00348-9
29. Kraljevic J., Kraljevic I., Kraljevic M. et al. Antioxidant enzyme activities in poultry // *Poultry Science*. 2015. Vol. 94. P. 123–130. DOI: 10.3382/ps/pev123
30. McDonald R. E., Hultin H. O. Lipid peroxidation system in muscle // *Journal of Food Science*. 1987. Vol. 52. P. 15–21. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1987.tb13962.x
31. Lie Ø., Syed M., Solbu H. Lysozyme activity determination // *Acta Veterinaria Scandinavica*. 1986. Vol. 27. P. 23–32. DOI: 10.1186/BF03546753
32. Davis A. K., Maney D. L., Maerz J. C. Leukocyte profiles and stress // *Functional Ecology*. 2017. Vol. 22. P. 760–772. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2008.01467.x
33. IBM Corp. *IBM SPSS Statistics for MacOS*, Version 28.0. Armonk, NY: IBM Corp., 2021.
34. Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed. New York: John Wiley & Sons, 2017. DOI: 10.1002/9781119492448.
35. Abbas, A. K., Lichtman, A. H., & Pillai, S. (2021). *Cellular and molecular immunology* (10th ed.). Elsevier.
36. Ahmadi, F., & Branch, N. (2012). Toxic effects of silver nanoparticles in broiler chickens. *Poultry Science*, 91(7), 1753–1759.

37. Ahmed, S. T., Islam, M. M., & Kim, G. M. (2019). Effects of silver nanoparticles on growth performance and lipid metabolism in poultry. *Animal Nutrition*, 5(3), 245–252.
38. Al-Sultan, S. I., Hussein, E. O. S., & Ahmad, A. F. (2016). Histopathological effects of silver nanoparticles in broiler chickens. *Veterinary World*, 9(6), 667–672.
39. Bhanja, S. K., Mandal, A. B., & Johri, T. S. (2015). In ovo nutrition and immune modulation in poultry. *Journal of Applied Poultry Research*, 24(4), 453–462.
40. Brown, T. P., Smith, M. H., & Jones, R. L. (2018). Measurement of cloacal temperature in poultry under heat stress conditions. *Poultry Science*, 97(5), 1782–1789.
41. Davis, M. E., Brown, A. N., & Wilson, J. P. (2017). Cytokine response in broiler chickens exposed to oxidative stress. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 192, 1–9.
42. Elkloub, K., Moustafa, M. E., & Soliman, M. M. (2015). Hematological response of broiler chickens to dietary additives. *International Journal of Poultry Science*, 14(2), 85–92.
43. Engvall, E., & Perlmann, P. (1971). Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA). *Immunochemistry*, 8(9), 871–874.
44. Friedewald, W. T., Levy, R. I., & Fredrickson, D. S. (1972). Estimation of LDL cholesterol. *Clinical Chemistry*, 18(6), 499–502.
45. Gornall, A. G., Bardawill, C. J., & David, M. M. (1949). Determination of serum proteins by biuret reaction. *Journal of Biological Chemistry*, 177(2), 751–766.
46. Hassan, H. M., Khalil, R. H., & Ali, M. A. (2021). Feed efficiency and metabolic adaptation in broilers. *Poultry Science*, 100(4), 101–108.
47. Janiszewska, J., & Bartosz, G. (2002). ABTS radical scavenging assay in antioxidant research. *Free Radical Research*, 36(6), 631–639.
48. Jones, P. H., Williams, K. L., & Roberts, S. A. (2012). Immunomodulatory effects of cytokines in poultry. *Developmental & Comparative Immunology*, 36(3), 457–465.
49. Kraljevic, P. S., Petrović, M., & Jovanović, M. (2015). Antioxidant enzymes in poultry under stress. *Biological Trace Element Research*, 168(2), 370–378.
50. Kregel, K. C. (2002). Heat shock proteins in stress response. *Physiology*, 17(4), 170–174.
51. Liu, Y., Zhang, X., & Chen, H. (2019). Antimicrobial effects of silver nanoparticles in poultry. *Nanomedicine*, 14(6), 789–803.
52. McDonald, R. E., & Hultin, H. O. (1987). Lipid peroxidation in biological systems. *Journal of Food Science*, 52(3), 710–712.
53. McGowan, M. W., Artiss, J. D., Strandbergh, D. R., & Zak, B. (1983). Triglyceride determination. *Clinical Chemistry*, 29(3), 538–542.
54. Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.

Стаття надійшла до редакції 22.07.2026

Стаття пройшла рецензування 25.08.2026

Стаття опублікована 30.09.2026