

Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 3. С. 56-68.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2026. Vol. 109. No. 3. P. 56-68.

Научная статья
УДК 636.5:577.17.049
doi: 10.33284/2658-3135-109-3-56

Влияние ультрадисперсных микроэлементов на продуктивность и физиолого-биохимический статус цыплят-бройлеров

Алексей Петрович Тузиков¹, Сергей Александрович Мирошников², Ольга Вилориевна Кван³

^{1,2,3}Оренбургский государственный университет имени А.В. Бондаренко, Оренбург, Россия

¹sergey_ru01@mail.ru

²rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>

³kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Аннотация. В работе исследовано влияние композиции ультрадисперсных частиц металлов-микроэлементов Fe, Cu, Zn и Mn в соотношении 2:2:5:3 на продуктивность и физиолого-биохимический статус цыплят-бройлеров кросса «РОСС-308». В основной учетный период продолжительностью 35 суток птица контрольной группы (n=35) получала полнорационный комбикорм ПК-5-2 П-393 до 28-суточного возраста и ПК-6 П-394 – в последующий период. Опытная птица дополнительно к основному рациону получала смесь препаратов ультрадисперсных частиц металлов-микроэлементов: железа, меди, цинка и марганца в соотношении 2:2:5:3, в I опытной – 0,02 ppm, во II – 0,07 ppm, в III – 0,2, в IV – 0,4 ppm и в V опытной группе – 0,8 ppm. По результатам экспериментального исследования получено, что в III опытной группе живая масса к концу экспериментального периода превысила контроль на 5,6 % ($P \leq 0,05$). Валовый прирост живой массы был выше контроля на 6,8 % ($P \leq 0,05$), среднесуточный прирост – 56,3 г при снижении конверсии корма до 1,32 кг/кг. В морфологическом составе крови III опытной группы содержание нейтрофилов увеличилось на 38,1 % ($P \leq 0,05$), эозинофилов – более чем в 2,2 раза ($P \leq 0,05$) при снижении количества моноцитов на 50,5 % ($P \leq 0,05$). Биохимические изменения характеризовались снижением концентрации глюкозы в отдельных опытных группах на 27,8-33,0 % ($P \leq 0,05$), общего белка – на 37,0-43,2 % ($P \leq 0,05$), повышением содержания альбумина в V группе на 83,9 % ($P \leq 0,05$) и активности АСТ во II-IV группах на 45,6-74,7 % ($P \leq 0,05$). Концентрация кальция снижалась на 42,3-57,7 % ($P \leq 0,05, 0,01$). Полученные результаты характеризуют дозозависимое влияние композиции ультрадисперсных микроэлементов на рост, продуктивность и метаболический профиль цыплят-бройлеров, при наиболее выраженном положительном эффекте дозировки 0,2 ppm.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры, кормление, гематологические показатели крови, продуктивность, ультрадисперсные микроэлементы

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (№ 075-15-2024-550).

Для цитирования: Тузиков А.П., Мирошников С.А., Кван О.В. Влияние ультрадисперсных микроэлементов на продуктивность и физиолого-биохимический статус цыплят-бройлеров // Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 3. С. 56-68. [Tuzikov AP, Miroshnikov SA, Kvan OV. The effect of ultrafine trace elements on the productivity and physiological and biochemical status of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2026;109(3):56-68. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-3-56>

Original article

The effect of ultrafine trace elements on the productivity and physiological and biochemical status of broiler chickens

Alexey P Tuzikov¹, Sergey A Miroshnikov², Olga V Kvan³

^{1,2,3}Orenburg State University named after AV Bondarenko, Orenburg, Russia

¹sergey_ru01@mail.ru

²rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>

³kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Abstract. The paper studies the effect of a composition of ultrafine particles of trace metals Fe, Cu, Zn and Mn in a ratio of 2:2:5:3 on the productivity and physiological and biochemical status of ROSS-308 broiler chickens. During the main accounting period of 35 days, the birds of the control group (n=35) received complete compound feed PK-5-2 P-393 up to 28 days of age and PK-6 P-394 in the subsequent period. In addition to the basic diet, the experimental bird received a mixture of preparations of ultrafine particles of trace metals: iron, copper, zinc and manganese in a ratio of 2:2:5:3, in the experimental group I - 0.02 ppm, in the II - 0.07 ppm, in the III - 0.2, in the IV - 0.4 ppm and in the V experimental group - 0.8 ppm. According to the results of the experimental study, it was found that in the III experimental group, the body weight by the end of the experimental period exceeded the control by 5.6% ($P \leq 0.05$). The gross increase in live weight was higher than the control by 6.8% ($P \leq 0.05$), the average daily increase was 56.3 g, with a decrease in feed conversion to 1.32 kg/kg. In the morphological composition of the blood of the III experimental group, the content of neutrophils increased by 38.1% ($P \leq 0.05$), eosinophils by more than 2.2 times ($P \leq 0.05$), with a decrease in the number of monocytes by 50.5% ($P \leq 0.05$). Biochemical changes were characterized by a decrease in glucose concentration in individual experimental groups by 27.8-33.0% ($P \leq 0.05$), total protein by 37.0-43.2% ($P \leq 0.05$), an increase in albumin content in group V by 83.9% ($P \leq 0.05$) and AST activity in groups II-IV by 45.6-74.7 % ($P \leq 0.05$). The calcium concentration decreased by 42.3-57.7% ($P \leq 0.05-0.01$). The results obtained characterize the dose-dependent effect of the composition of ultrafine trace elements on the growth, productivity and metabolic profile of broiler chickens, with the most pronounced positive effect of a dosage of 0.2 ppm.

Keywords: broiler chickens, feeding, hematological parameters of blood, productivity, ultrafine trace elements

Acknowledgements: the research was carried out with the support of a grant for major scientific projects in priority areas of scientific and technological development (No. 075-15-2024-550).

For citation: Tuzikov AP, Miroshnikov SA, Kvan OV. The effect of ultrafine trace elements on the productivity and physiological and biochemical status of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2026;109(3):56-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-3-56>

Введение.

Современное промышленное птицеводство ориентировано на реализацию генетического потенциала высокопродуктивных кроссов, что требует совершенствования систем кормления и повышения эффективности использования питательных веществ рациона (Пономаренко Ю.А. и др., 2024). Особое значение в этих процессах принадлежит микроэлементам, участвующим в регуляции ферментативной активности, белкового, энергетического и минерального обменов. В настоящее время в практике птицеводства используется целый ряд источников химических элементов. В числе новых – ультрадисперсные формы металлов-микроэлементов (Сизова Е.А. и др., 2018).

Наука в последние годы накопила значительный багаж знаний по применению препаратов ультрадисперсных частиц (УДЧ) металлов-микроэлементов в птицеводстве. Так, только на ресурсе PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>), по ключевым словам, «nanoparticles and chicken» выявляется более 1,6 тысяч полнотекстовых и реферативных работ. Анализ результатов исследований по проблеме показывает, что, как правило, в подавляющем числе исследований речь идет о приме-

нии препаратов УДЧ, содержащих, одно действующее вещество. В информационных ресурсах почти нет данных о применении комплексных препаратов.

Цель исследования.

Комплексная оценка влияния композиции ультрадисперсных микроэлементов Fe, Cu, Zn и Mn на продуктивность, гематологические показатели крови и особенности белкового метаболизма на основании оценки биохимических индексов, учитывающих основные пути выведения азота у сельскохозяйственных птиц.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Цыплята-бройлеры кросса «РОСС-308».

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г., протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были приняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Цыплята-бройлеры кросса «РОСС-308» в условиях ОАО «Птицефабрика Оренбургская» (Оренбургский район, Оренбургская область) в возрасте двух недель после недели подготовительного периода последовательно содержались на стартере и ростовом полнорационном комбикорме. В основной учетный период продолжительностью 35 суток птица контрольной группы (n=35) получала полнорационный комбикорм ПК-5-2 П-393 до 28-суточного возраста и ПК-6 П-394 – в последующий период. Опытная птица дополнительно к основному рациону получала смесь препаратов ультрадисперсных частиц металлов-микроэлементов: железа, меди, цинка и марганца в соотношении 2:2:5:3, в I опытной – 0,02 ppm, во II – 0,07 ppm, в III – 0,2, в IV – 0,4 ppm и в V опытной группе – 0,8 ppm. Кормление подопытной птицы в ходе первого исследования производили в соответствии с действующими рекомендациями ВНИТИПа (2021).

Ростовой комбикорм был произведен на пшеничной основе. Расчетная питательность комбикорма составила 12,7 МДж/кг или 3150 ккал/кг. Белковая питательность комбикорма балансировалась за счет введения шротов соевого и подсолнечного, муки мясной, а также синтетических аминокислот: L-лизин сульфат; L-треонин 98 %; DL-метионин 98,5 %. Комбикорм балансировался по минеральной питательности за счет введения премикса П-1-11075-1.0 Эйви, монокальций фосфата, известняка, соли поваренной и сульфата натрия.

Ультрадисперсные препараты цинка, марганца, меди и железа (d=40-60 нм) были синтезированы методом плазменно-дуговой технологией на углеродной матрице (Semikolenova O et al., 2021) в Институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН.

Рост цыплят оценивался на протяжении всего эксперимента путем индивидуального ежедневного взвешивания утром перед кормлением. Учет поедаемости кормов осуществляли ежедневно. На основании полученных результатов рассчитывался среднесуточный прирост, потребление корма и расход корма.

С целью изучения оцениваемых факторов на организм подопытной птицы был проведен контрольный убой в конце эксперимента, материалом для гематологического анализа служили образцы периферической крови, которую отбирали из подкрыльцовой вены на 42-е сутки в стерильные вакуумные пробирки, содержащие активатор свертывания крови («Greiner Bio-One International AG», Австрия). Образцы доставляли в лабораторию при температуре от +4 до +8 °C в течение 1 ч. Сыворотку получали центрифугированием крови при комнатной температуре (+20...+22 °C) в течение 10 мин при 1000 g.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены в Центре коллективного пользования ФНЦ БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>). Определение морфологических показателей крови проводили на автоматическом ветеринарном гематологическом анализаторе DF50 Vet (Dymind, КНР), а биохимических параметров крови – с использованием автоматического биохимического анализатора CS-T240 (DIRUI Industrial Co, Ltd, Китай) и коммерческих наборов для ветеринарии (ДИАКОН-ДС, Россия; Randox Laboratories, Великобритания).

Статистическая обработка. Численные данные были обработаны с помощью программы SPSS «Statistics 20» («IBM», США), рассчитывали средние значения (М) и ошибку среднего значения ($\pm m$). Для сравнения вариантов использовали параметрический метод анализа. Различия считали статистически значимыми при * – $P \leq 0,05$, ** – $P \leq 0,01$. Величину коэффициентов корреляции определяли по Пирсону.

Результаты исследования.

В исследованиях мы констатировали 100 % сохранность всей подопытной птицы. При этом живая масса птицы различалась (табл. 1).

Таблица 1. Динамика живой массы подопытных цыплят-бройлеров, г
Table 1. Dynamics of live weight of experimental broiler chickens, g

Группа / Group	Неделя эксперимента / A week of experiment				
	1	2	3	4	5
Контроль / Control	401,3 $\pm$ 13,1	763,3 $\pm$ 30,2	1251,2 $\pm$ 42,1	1786,1 $\pm$ 55,1	2261,3 $\pm$ 72,2
I опытная/I experimental	401,3 $\pm$ 17,4	716,7 $\pm$ 33,4	1184,3 $\pm$ 47,3	1717,7 $\pm$ 61,3	2202,7 $\pm$ 78,1
II опытная/II experimental	401,0 $\pm$ 18,4	737,5 $\pm$ 35,1	1193,0 $\pm$ 48,2	1747,0 $\pm$ 77,2	2283,0 $\pm$ 99,1
III опытная/ III experimental	402,3 $\pm$ 9,23	799,1 $\pm$ 25,2*	1323,3 $\pm$ 44,4*	1883,7 $\pm$ 78,1*	2388,8 $\pm$ 114,3*
IV опытная/ IV experimental	401,3 $\pm$ 10,1	773,3 $\pm$ 28,1	1243,4 $\pm$ 30,2	1757,2 $\pm$ 47,2	2271,3 $\pm$ 61,1
V опытная/V experimental	401,0 $\pm$ 11,1	756,1 $\pm$ 27,3	1265,3 $\pm$ 56,3	1850,3 $\pm$ 105,3	2351,2 $\pm$ 131,2

Примечание: * – $P \leq 0,05$

Note: * – $P \leq 0,05$

На второй неделе эксперимента выраженный достоверный прирост зарегистрирован в III опытной группе, где живая масса достигла 799,1 г, что на 4,5 % ($P \leq 0,05$) выше контрольной группы. В последующий период наблюдалась схожая картина, в результате за эксперимент наибольшая живая масса отмечена в III опытной группе – 2351,2 г, что превышало контрольное значение на 5,6 % ($P \leq 0,05$), наименьшие показатели зарегистрированы у птицы I опытной группы, живая масса была ниже контроля на 2,6 %.

За экспериментальный период валовый прирост живой массы в контрольной группе составил 1860,0 г, среднесуточный прирост – 53,1 г и конверсия корма – 1,48. Наименьшие показатели продуктивности зарегистрированы в I опытной группе: валовый прирост составил 1801,4 г, что было ниже контроля на 3,2 %, коэффициент конверсии корма увеличился на 2,0 % относительно контроля, что указывает на повышение затрат корма на единицу прироста. Во II опытной группе продуктивность подопытной птицы была на уровне контроля, а коэффициент конверсии снизился на 0,7 %. В III опытной группе отмечены высокие показатели продуктивности, валовый прирост превысил контроль на 6,8 % ($P \leq 0,05$), конверсия корма в этой группе оказалась лучше контроля на 12,1 % ($P \leq 0,05$). Высокие показатели продуктивности отмечены также в V опытной группе: общий прирост превысил контрольную группу на 5,4 %, коэффициент конверсии снизился на 4,7 %. Таким образом, дозировка препарата в 0,2 ppm оказала выраженное ростостимулирующее действие.

Анализ крови позволяет оценить адаптационные механизмы организма птицы на действие используемых кормовых добавок (табл. 2).

Таблица 2. Морфологические показатели крови подопытных цыплят-бройлеров в возрасте 42 суток

Table 2. Morphological parameters of blood of experimental broiler chickens at 42 days of age

Показатель / Indicator	Контроль/ Control	Опытная группа / Experimental group				
		I	II	III	IV	V
Лейкоциты, $10^9/\text{л}$ / Leukocyte, $10^9/\text{л}$	40,2±3,46	39,6±2,94	35,2±3,2	42,2±0,41	33,3±2,18	39,1±1,95
Нейтрофилы, $10^9/\text{л}$ / Neutrophils, $10^9/\text{л}$	13,9±0,75	14,5±0,67	9,75±1,81*	19,2±1,36*	10,5±2,12	13,9±2,79
Лимфоциты, $10^9/\text{л}$ / Lymphocytes, $10^9/\text{л}$	21,6±4,56	22,4±2,13	23,8±5,05	17,3±1,21	21,0±2,88	22,1±5,11
Моноциты, $10^9/\text{л}$ / Monocytes, $10^9/\text{л}$	2,18±1,84	1,12±0,03*	1,09±0,07*	1,08±0,83*	1,20±0,18*	1,31±0,20*
Эозинофилы, $10^9/\text{л}$ / Eosinophils, $10^9/\text{л}$	2,11±0,49	2,28±0,56	1,26±0,39*	4,61±0,18*	1,42±0,26**	2,56±1,13
Базофилы, $10^9/\text{л}$ / Basophils, $10^9/\text{л}$	0,16±0,06	0,17±0,05	0,24±0,01*	0,14±0,06	0,18±0,01	0,11±0,05
Эритроциты, $10^{12}/\text{л}$ / Erythrocytes, $10^{12}/\text{л}$	2,13±0,06	2,21±0,08	2,06±0,02	2,07±0,04	1,8±0,08	1,87±0,04
Гемоглобин, г/л / Hemoglobin, g/l	125,3±5,36	124,7±3,48	108,3±15,6	126,3±1,67	112,7±4,41	119,7±2,03
Гематокрит, % / Hematocrit, %	26,7±1,01	26,9±0,52	26,4±0,26	25,5±0,6	22,7±0,86	24,3±0,44
Тромбоциты, $10^9/\text{л}$ / Platelets, $10^9/\text{л}$	0,67±0,03	0,33±0,01**	0,23±0,03**	0,22±0,01**	0,67±0,03	1,33±0,02*

Примечание: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$ Note: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$

Содержание нейтрофилов в крови птицы II опытной группы достоверно снижено на 29,9 % ($P \leq 0,05$), в III опытной группе, напротив, достоверное повышение на 38,1 % ($P \leq 0,05$) в сравнении с контролем. Концентрация лимфоцитов изменялась незначительно, во всех опытных группах и сохранялась близко к контрольным значениям. Уровень моноцитов в опытных группах достоверно снижался по отношению к контрольной группе на 48,6 %, 50,0 %, 50,5 %, 44,9 % и на 39,9 % ($P \leq 0,05$) соответственно.

Количество эозинофилов характеризовалось разнонаправленными изменениями. Во II опытной группе показатель снизился на 40,3 % ($P \leq 0,05$), в IV – на 32,7 % ($P \leq 0,05$), напротив, в III опытной группе содержание последних увеличилось более чем в 2,2 раза ($P \leq 0,01$), в V группе также отмечена тенденция к увеличению, но без достоверных различий. Содержание базофилов во всех группах остается низким, достоверное увеличение показателя зарегистрировано только во II опытной группе, где концентрация базофилов превысила контроль на 50,0 % ($P \leq 0,05$), в остальных группах изменения были незначительными.

Концентрация тромбоцитов в I опытной группе снизилась в 2,03 раза ($P \leq 0,01$), во II и III опытных группах – в 2,91 и в 3,05 раза ($P \leq 0,01$) соответственно, в V опытной группе выявлено повышение в 1,98 раз ($P \leq 0,05$).

Биохимические показатели крови характеризуют обменные процессы, функциональное состояние печени и почек, обеспеченность организма энергетическими субстратами, а также уровень минерального обмена (табл. 3).

Таблица 3. Биохимические показатели сыворотки крови подопытных цыплят-бройлеров в возрасте 42 суток

Table 3. Biochemical parameters of blood of experimental broiler chickens at 42 days of age

Показатель / Indicator	Кон- троль / Control	Опытная группа / Experimental group				
		I	II	III	IV	V
Глюкоза, ммоль/л / Glucose, mmol/l	9,76±0,78	8,55±0,42	7,05±1,03*	9,05±1,52	6,54±1,27*	7,08±0,51*
Общий белок, г/л / Total protein, g/l	53,0±7,13	56,9±7,79	30,1±4,59*	38,7±5,95	33,4±8,94*	36,4±4,82
Альбумин, г/л / Albumin, g/l	14,3±1,86	15,7±2,33	19,7±2,67	14,3±0,88	19,6±3,18	26,3±2,03*
АЛТ, Ед/л / ALT, Unit/l	23,0±7,8	19,2±1,85	28,9±5,99	18,1±1,27	26,4±7,34	21,9±2,76
АСТ, Ед/л / AST, Unit/l	203,5±21,5	258,4±88,9	343,6±68,5*	296,2±5,0*	355,5±26,6*	226,2±37,2
Билирубин общий, мкмоль/л / Total bili- rubin, mmol/l	4,57±1,57	2,77±0,79*	2,91±1,81	2,47±0,67	2,13±0,52	3,4±0,96
Холестерин, ммоль/л / Cholesterol, mmol/l	3,69±1,3	4,87±0,29	3,59±0,63	4,37±0,89	5,45±1,6*	3,81±1,31
Триглицериды, ммоль/л / Triglycer- ides, mmol/l	0,13±0,009	0,13±0,012	0,13±0,012	0,13±0,012	0,14±0,012	0,11±0,003*
Мочевина, ммоль/л / Urea, mmol/l	2,1±0,36	2,8±0,25	2,6±0,1	2,97±0,24	3,27±0,52	3,6±0,46*
Креатинин, ммоль/л / Creatinine, mmol/l	0,026±0,003	0,03±0,005	0,03±0,002	0,04±0,009	0,04±0,0003	0,027±0,002
Отношение мочеви- ны к креатину / Urea to creatine ratio	81:1	93:1	87:1	74:1	82:1	133:1
Мочевая кислота, мкмоль/л / Urinary acid, mmol/l	492,1±15,5	229,1±56,9*	395,3±113,0	365,2±36,1	343,1±118,0	384,2±28,1
Кальций, ммоль/л / Calcium, mmol/l	4,97±0,15	2,87±0,86*	2,33±0,34*	2,47±0,09	2,97±0,52	2,1±0,25**
Фосфор, ммоль/л / Phosphorus, mmol/l	3,03±0,71	1,6±0,39*	1,14±0,09**	1,35±0,04**	1,94±0,56	2,01±0,55

Примечание: * – P≤0,05; ** – P≤0,01

Note: * – P≤0.05; ** – P≤0.01

Содержание глюкозы в сыворотке крови в опытных группах снижалось: во II опытной группе – на 27,8 % (P≤0,05), в IV и V опытных группах – на 33,0 % и на 27,5 % (P≤0,05) соответственно. Концентрация общего белка во II и в IV опытных группах была ниже на 43,2 % и на 37,0 % (P≤0,05) по сравнению с контрольной группой. При этом содержание альбумина увеличивалось, но без значимых различий, за исключением V группы, где отмечено повышение в 1,83 раза (P≤0,05).

Содержание триглицеридов характеризовалось в I-IV опытных группах определенной стабильностью по сравнению с контрольной, в абсолютных значениях – 0,13-0,14 ммоль/л, в V опытной группе выявлено достоверное снижение на 15,4 % (P≤0,05), по сравнению с контролем.

Активность аланинаминотрансферазы не менялась и находилась в пределах физиологической нормы, что свидетельствует об отсутствии воспалительных процессов в печени. Уровень аспартатаминотрансферазы изменился во II и IV опытных группах, отмечено увеличение в 1,68 раза и в 1,74 раз (P≤0,05) относительно контроля. Концентрация общего билирубина во всех опытных группах была ниже контроля, достоверное снижение зарегистрировано в I опытной группе – на 39,4 % (P≤0,05) по отношению к контролю.

Концентрация кальция было снижена в I, во II и в V опытных группах на 42,3 %, 53,1 % ($P \leq 0,05$) и на 57,7 % ($P \leq 0,01$) соответственно, аналогичная закономерность выявлена для фосфора: во II и III опытных группах содержание элемента уменьшилось более чем в 2,0 раза ($P \leq 0,01$), в I группе снижение составило 33,7 % ($P \leq 0,05$) по сравнению с контролем.

Показатели азотистого обмена также изменились неодинаково: концентрация мочевины снизилась во II опытной группе на 23,8 % ($P \leq 0,05$), тогда как в остальных группах наблюдалось увеличение этого показателя, наиболее выраженное в V группе – в 1,71 раз ($P \leq 0,05$). Содержание креатинина во всех экспериментальных группах, за исключением V группы, превышало контрольные значения. Уровень мочевой кислоты во всех опытных группах был ниже контроля, наиболее выражено в I опытной группе – на 53,5 % ($P \leq 0,05$) по отношению к контролю, в остальных группах снижение составило 19,8-30,2 %.

Увеличение дозировки препарата отразилось на совокупном содержании азота в отдельных компонентах сыворотки крови (табл. 4).

Таблица 4. Содержание азота в компонентах сыворотке крови подопытной птицы, ммоль/л
Table 4. Nitrogen content in blood serum components of experimental poultry, mmol/l

Показатель / <i>Indicator</i>	Контроль / <i>Control</i>	Опытная группа / <i>Experimental group</i>				
		I	II	III	IV	V
Азот мочевины / <i>Urea nitrogen</i>	0,95±0,16	1,27±0,11	1,175±0,05	1,342±0,108	1,478±0,24	1,63±0,23*
Азот мочевой кислоты / <i>Uric acid nitrogen</i>	0,16±0,005	0,076±0,019*	0,13±0,04	0,12±0,012	0,11±0,04	0,13±0,009
Сумма азота мочевины и мочевой кислоты / <i>The sum of urea nitrogen and uric acid</i>	1,11±0,21	1,34±0,19	1,31±0,08	1,46±0,14	1,59±0,27	1,76±0,29
Азот в креатине / <i>Nitrogen in creatine</i>	0,0099±0,0011	0,011±0,0019	0,012±0,0008	0,014±0,0034	0,014±0,0001	0,01±0,0008
Отношение азота мочевины и мочевой кислоты к азоту креатина / <i>Ratio of urea nitrogen and uric acid to creatine nitrogen</i>	113:1	120:1	110:1	105:1	112:1	176:1
Азот белка / <i>Protein Nitrogen</i>	582±6,49	650±7,09	344±4,18*	442±5,41	382±8,14*	416±4,39
Азот альбумина / <i>Albumin Nitrogen</i>	163±1,63	179±2,10	225±2,34	163±0,77	224±2,44	301±1,57*

Примечание: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$ /Note: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$

Анализ содержания азотистых компонентов сыворотки крови показал, что применение исследуемой композиции сопровождалось изменением характера азотистого обмена у подопытной птицы. Концентрация азота мочевины во всех опытных группах превышала контрольное значение и составляла 1,175-1,627 ммоль/л, что соответствует увеличению на 23,8-71,4 %.

Обсуждение полученных результатов.

Наука накопила значительный багаж знаний по применению препаратов ультрадисперсных частиц металлов-микроэлементов в птицеводстве, в том числе ультрадисперсных форм меди, цинка, марганца и других микроэлементов (Sizova E et al., 2020; Мингазова М.С. и др., 2026). Однако, как правило, в подавляющем числе таких исследований речь идет о применении препаратов УДЧ, содержащих, одно действующее вещество. В информационных ресурсах почти нет данных о применении комплексных препаратов.

В связи с этим нами проведены исследования по применению в кормлении цыплят-бройлеров препарата углеродных ультрадисперсных частиц четырех металлов-микроэлементов: медь, цинк, железо и марганец. Такая комбинация веществ определялась нами на основании данных о существующих дефицитах в рационе цыплят-бройлеров (Пономаренко Ю.А. и др., 2024).

При планировании эксперимента была поставлена цель максимально расширить диапазон используемых дозировок УДЧ от 0,02 до 0,8 ppm при расхождении в 40 раз. Это было сделано для того, чтобы, установив наиболее оптимальную дозировку с наибольшим продуктивным действием, если таковая будет, оценить и возможное негативное действие препарата. Рабочей гипотезой предполагалось, что может быть зафиксировано для максимальной по эксперименту дозировке УДЧ.

Как следует из полученных данных, дозировки препарата в 0,02 и 0,07 ppm не оказали сколько-нибудь заметного действия на интенсивность роста птицы, в результате за период исследований цыплята в опытных группах по абсолютному приросту отличались от контроля только на 1,1-3,3%. В то же время дальнейшее повышение концентрации до 0,2 ppm позволило достоверно увеличить прирост живой массы птицы на 6,8 % ($P \leq 0,05$) в сравнении с контролем.

В целях более детальной оценки действия различных дозировок совместного применения четырех препаратов УДЧ металлов-микроэлементов на организм птицы мы исходили из того, что любой вид продукции сельскохозяйственных животных, это есть не что иное как видоизмененный корм. С этих позиций эффективность процесса «питания» организмами «отрицательной энтропией» по Erwin Schrödinger с акцентом на формирование добавленной «стоимости» пересборки веществ корма в продукцию сельскохозяйственных животных можно рассматривать как превышение массы вновь синтезированных белков в живом организме над массой расщепляемых, как известно, в организме взрослой курицы в сутки синтезируется около 30 граммов белка и 20-26 грамм белка расщепляется (Федорова Е.Ю. и др., 2019), соответственно, чем разница между синтезом и деградацией выше, тем выше продуктивность.

С этих позиций для продуктивной оценки влияния препаратов УДЧ металлов-микроэлементов в качестве характеристик процесса расщепления белка очевидно подходит содержание в сыворотке крови мочевой кислоты и мочевины. У птиц мочевая кислота и мочевина – конечный продукт белкового обмена (Злепкин А.Ф. и др., 2018). Для оценки уровня синтеза белка по составу крови можно рассматривать содержание общего белка в крови (Лебедев С.В. и др., 2025), уровень альбуминов (Повозников Н.Г. и Пустовая Н.В., 2013), а также в отдельных случаях уровень – креатинина (Paulus MC et al., 2025).

В своих исследованиях нами был констатирован факт увеличения содержания мочевины в сыворотке крови цыплят. Так, концентрация мочевины выросла с 2,1 ммоль/л в контроле до 2,8 и 2,6 ммоль/л – в I и II опытных группах, до 2,97; 3,27 и 3,6 ммоль/л – в III, IV и V опытных группах соответственно. При различиях между контрольной и V опытной группами 71,4 % ($P \leq 0,05$). В то же время содержание мочевой кислоты, напротив, не достоверно, но снижалось с 492 мкмоль/л в контроле до 229-396 мкмоль/л в сыворотке крови опытной птицы.

При этом уровень общего белка в сыворотке снижался с 53 г/л в контроле и 56,9 г/л в I опытной группе при минимальной концентрации кормовой добавки до 30,1-36,4 г/л в других опытных группах. Следует отметить, что снижение содержания общего белка могло быть связано с интенсивным использованием этих веществ в метаболизме (Повозников Н.Г. и Пустовая Н.В., 2013). В целом биохимический профиль крови птицы отражает усиление обменных процессов. Так, снижение концентрации глюкозы в отдельных опытных группах при одновременном повышении продуктивности указывает на активное использование энергетических субстратов в процессе роста, подобная закономерность соответствует другим исследованиям (Amein SM et. al., 2025).

Повышение активности аспаратаминотрансферазы, отмеченное преимущественно во II-IV опытных группах, при отсутствии выраженных изменений активности АЛТ и концентраций билирубина, возможно связано с увеличением интенсивности белкового обмена, аналогичная взаимосвязь представлена в исследованиях. В подтверждение этого снижение концентрации кальция и фосфора в сыворотке крови может отражать активное их включение в процессы формирования костной ткани (Saber HS and Alian HA, 2026).

При обработке полученных данных были использованы существующие подходы, описанные в исследованиях (Ferrie S and Tsang E, 2018; Zhang Z et al., 2020; Paulus MC et al., 2025). В частности, для характеристики баланса «синтез/распад» принято использовать для млекопитающих соотношение мочевины плазмы крови к креатинину, что позволяет дать оценку интенсивности белкового распада с «фоновым» мышечным метаболизмом (креатинин). Если соотношение повышено, это часто говорит об усиленном катаболизме. То есть организм активно расщепляет белки, возможно, из-за стресса, болезни, несбалансированного рациона и др. Если соотношение снижено, это может указывать на то, что синтез белков преобладает над распадом (организм строит ткани, то есть растет, набирает массу) либо на то, что поступление белка с кормом снижено. В наших исследованиях соотношение мочевины сыворотки крови к креатину в контроле составило 80 к 1. По мере увеличения дозировки УДЧ это соотношение сначала росло до 93 и 87 к 1, с некоторым снижением в III опытной группе до 74 к 1, с последующим стремительным ростом до 82 и 133 в IV и V опытной группе соответственно. Принципиально полученные данные подтверждают результаты ранее проведенных исследований (Ferrie S and Tsang E, 2018; Zhang Z et al., 2020), указывающих на прямую зависимость соотношения мочевины и креатина в сыворотке крови от интенсивности катаболизма. Как показано в таблице 1, наибольшая живая масса птицы зафиксирована именно в III опытной группе – 2388,8 г.

Аналогичным образом изменялось более широкое отношение азота мочевины и мочевой кислоты к азоту креатина. Как следует из полученных данных значения соотношения азота мочевины и мочевой кислоты к азоту креатина тесно коррелировали с величиной дозировок препарата УДЧ металлов-микроэлементов с $r=0,831$.

На основании вышесказанного можно утверждать, что низкие дозы УДЧ в I, II и III опытных группах способствовали оптимизации белкового обмена. Так, азот эффективнее использовался в тканях для роста, на фоне этого концентрация мочевой кислоты снижалась, а содержание креатинина, напротив, росло. Но при высоких дозах в IV и V опытных группах возникает перегрузка, а именно растет нагрузка на мышцы/сердце. Однако использованные препараты способствовали синтетической функции печени, что выражалось почти двукратным ростом концентрации и альбуминов в сыворотке крови.

В то же время препараты УДЧ металлов-микроэлементов способствовали повышению иммунитета подопытной птицы. В частности, изменения, выявленные в лейкоцитарной формуле III опытной группы, с тенденцией к увеличению содержания нейтрофилов при стабильном уровне общего количества лейкоцитов, отражают активацию неспецифической резистентности организма без признаков воспалительного процесса, аналогичные изменения клеточного состава крови при использовании УДЧ, что ранее описано в других исследованиях (Hatab MH et al., 2024).

Заключение.

Применение комплексного препарата УДЧ металлов• микроэлементов, содержащих железо, медь, цинк и марганец в соотношении 2:2:5:3, оказывает дозозависимое влияние на продуктивность цыплят• бройлеров и параметры азотистого обмена, оптимальный эффект достигается при умеренной дозировке (0,2 ppm). По результатам экспериментального исследования выявлено, что в III опытной группе живая масса к концу экспериментального периода превысила контроль на 5,6 % ($P \leq 0,05$). Валовый прирост живой массы был выше контроля на 6,8 % ($P \leq 0,05$), среднесуточный прирост – 56,3 г при снижении конверсии корма до 1,32 кг/кг. В морфологическом составе крови III опытной группы содержание нейтрофилов увеличилось на 38,1 % ($P \leq 0,05$), эозинофилов – более чем в 2,2 раза ($P \leq 0,05$) при снижении количества моноцитов на 50,5 % ($P \leq 0,05$). Биохимические изменения характеризовались снижением концентрации глюкозы в отдельных опытных группах на 27,8-33,0 % ($P \leq 0,05$), общего белка – на 37,0-43,2 % ($P \leq 0,05$), повышением содержания альбумина в V группе на 83,9 % ($P \leq 0,05$) и активности АСТ во II-IV группах на 45,6-74,7 % ($P \leq 0,05$). Концентрация кальция снижалась на 42,3-57,7 % ($P \leq 0,05-0,01$). Полученные результаты характеризуют дозозависимое влияние композиции ультрадисперсных микроэлементов на рост, продуктивность и метаболический профиль цыплят-бройлеров при наиболее выраженном положительном эффекте дозировки 0,2 ppm.

Список источников

1. Злепкин А.Ф., Саломатин В.В., Паршкова В.О. Биохимические показатели крови, характеризующие белковый обмен у цыплят-бройлеров при введении в рацион селенсодержащих препаратов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. Т. 3. № 51. С. 242-246. [Zlepkin AF, Salomatin VV, Parshkova VO. Biochemical indicators of blood characterizing proteins of chicken-broilers when introducing a selenium-containing preparation in the ration. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleks: Science and higher professional education. 2018;3(51):242-246. (In Russ)].
2. Лебедев С.В., Шаврина И.В., Здоров А.Н. Зоотехнические характеристики и биохимические показатели крови цыплят-бройлеров при использовании кавитированных пшеничных отрубей в рационе // Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 4. С. 310-319. [Lebedev SV, Shavrina IV, Zdorov AN. Zootechnical characteristics and biochemical parameters of broiler chicken blood fed with cavitated wheat bran. Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(4):310-319. (In Russ)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-4-310>
3. Методическое пособие по кормлению сельскохозяйственной птицы: метод. указания / И.А. Егоров и др.; под общ. ред. В.И. Фисинина, И.А. Егорова. Сергиев Посад: ВНИТИП, 2021. 360 с. [Egorov I, et al. Metodicheskoe posobie po kormleniyu selskokhozyaistvennoi ptitsi: metod. ukazaniya. Pod obshch. red. Fisinina V, Yegorova IA. Sergiev Posad: VNITIP; 2021:360 p. (In Russ)].
4. Наноккомпозит как перспективная кормовая добавка для цыплят-бройлеров / М.С. Мингазова, Е.П. Мирошникова, С.А. Мирошников, Ю.В. Килякова, А.Е. Аринжанов // Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 1. С. 167-183. [Mingazova MS, Miroshnikova EP, Miroshnikov SA, Kilyakova YuV, Arinzhanov AE. Nanocomposite as a promising feed additive for broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2026;109(1):167-183. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-1-167>
5. Повозников Н.Г., Пустовая Н.В. Продуктивность и биохимический состав крови кур // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2013. Т. 16. № 2. С. 206-215. [Povoznikov NG, Pustovaya NV. Productivity and biochemical composition of blood of chickens. Actual Problems of Intensive Development of Animal Husbandry. 2013;16(2):206-215. (In Russ)].
6. Пономаренко Ю.А., Фисинин В.И., Егоров И.А. Научные основы сбалансированного кормления животных: монография. М.: Изд-во: «Перо» 2024. 692 с. [Ponomarenko YuA, Fisinin VI, Egorov IA. Nauchnye osnovy sbalansirovannogo kormleniya zhivotnykh: monografiya. M.: Izd-vo: «Pero» 2024. 692 s.]

renko YuA, Fisinin VI, Egorov IA. Scientific foundations of balanced animal feeding: the monograph. Moscow: Publishing house: Pen; 2024:692 p. (*In Russ*).

7. Сравнительные испытания ультрадисперсного сплава, солей и органических форм Cu и Zn как источников микроэлементов в кормлении цыплят-бройлеров / Е.А. Сизова, С.А. Мирошников, С.В. Лебедев, Ю.И. Левахин, И.А. Бабичева, В.И. Косилов // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 2. С. 393-403. [Sizova EA, Miroshnikov SA, Lebedev SV, Levakhin YuI, Babicheva IA, Kosilov VI. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2018;53(2):393-403. (*In Russ*)]. doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.393rus doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.393eng

8. Физиология животных: особенности обменных процессов в организме сельскохозяйственной птицы: учеб. пособие / Е.Ю. Федорова, В.И. Максимов, О.В. Смоленкова, В.В. Мосягин. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. 143 с. [Fedorova EYu, Maksimov VI, Smolenkova OV, Mosyagin VV. Animal physiology: features of metabolic processes in the body of poultry. Saratov: IPR Media; 2019:143 p. (*In Russ*)].

9. Amein SM, Abdel-Raheem HA, Ahmed AN, Karimi M, Eldeeb FA. Potential dietary of manganese, zinc and copper nanoparticles supplementation in improving growth performance, blood metabolites and cecal short-chain fatty acids of broilers. Journal of Advanced Veterinary Research. 2025;15(4):448-455.

10. Hatab MH, Badran AMM, Elaroussi MA, Rashad E, Taleb AMA, Elokil AA. Effect of zinc oxide nanoparticles as feed additive on blood indices, physiological, immunological responses, and histological changes in broiler chicks. Biol Trace Elem Res. 2024;202(5):2279-2293. doi: 10.1007/s12011-023-03820-y

11. Ferrie S, Tsang E. Monitoring nutrition in critical illness: what can we use? Nutr Clin Pract. 2018;33(1):133-146. doi: 10.1177/0884533617706312

12. Paulus MC, Melchers M et al. The urea-to-creatinine ratio as an emerging biomarker in critical care: a scoping review and meta-analysis. Critical Care. 2025;29:175. <https://doi.org/10.1186/s13054-025-05396-6>

13. Saber HS, Alian HA. Nano zinc oxide improves growth rate, carcass traits, meat chemical composition, serum and tissue mineral profiles, mineral retention, and intestinal morphology in broiler chickens compared to inorganic and organic zinc. Biol Trace Elem. 2026;204:909-924. <https://doi.org/10.1007/s12011-025-04716-9>

14. Semikolenova O, Sakovina L, Akhmetova E, Kim D, Vokhtantsev I, Golyshev V, Vorobyeva M, Novopashin S, Novopashina D. Photoactivatable nanoCRISPR/Cas9 system based on crRNA reversibly immobilized on carbon nanoparticles. International Journal of Molecular Sciences. 2021;22(20):10919. doi: 10.3390/ijms222010919

15. Sizova E, Miroshnikov S, Lebedev S, Usha B, Shabunin S. Use of nanoscale metals in poultry diet as a mineral feed additive. Animal Nutrition. 2020;6(2):185-191. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.11.007>

16. Zhang Z, Ho KM, Gu H, Hong Y, Yu Y. Defining persistent critical illness based on growth trajectories in patients with sepsis. Crit Care. 2020;24(1):57. doi: 10.1186/s13054-020-2768-z

References

1. Zlepkin AF, Salomatov VV, Parshkova VO. Biochemical blood parameters characterizing protein metabolism in broiler chickens with the introduction of selenium-containing preparations into the diet. News of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education. 2018;3(51):242-246.

2. Lebedev SV, Shavrina IV, Zdorov AN. Zootechnical characteristics and biochemical parameters of broiler chicken blood fed with cavitated wheat bran. Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(4):310-319. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-4-310>

3. Egorov I, et al. Metodicheskoe posobie po kormleniyu selskokhozyaistvennoi ptitsi: metod. ukazaniya. Pod obshch. red. Fisnina V, Yegorova IA. Sergiev Posad: VNITIP; 2021:360 p.
4. Mingazova MS, Miroshnikova EP, Miroshnikov SA, Kilyakova YuV, Arinzhanov AE. Nanocomposite as a promising feed additive for broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2026;109(1):167-183. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-1-167>
5. Povochnikov NG, Pustovaya NV. Productivity and biochemical composition of blood of chickens. *Actual Problems of Intensive Development of Animal Husbandry*. 2013;16(2):206-215.
6. Ponomarenko YuA, Fisnin VI, Egorov IA. Scientific foundations of balanced animal feeding: the monograph. Moscow: Publishing house: Pen; 2024:692 p.
7. Sizova EA, Miroshnikov SA, Lebedev SV, Levakhin YuI, Babicheva IA, Kosilov VI. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. *Agricultural Biology*. 2018;53(2):393-403. doi: 10.15389/agrobiol.2018.2.393rus doi: 10.15389/agrobiol.2018.2.393eng
8. Fedorova EYu, Maksimov VI, Smolenkova OV, Mosyagin VV: guide. *Animal physiology: features of metabolic processes in the body of poultry*. Saratov: IPR Media; 2019:143 p.
9. Ameen SM, Abdel-Raheem HA, Ahmed AN, Karmi M, Eldeeb FA. Potential dietary of manganese, zinc and copper nanoparticles supplementation in improving growth performance, blood metabolites and cecal short-chain fatty acids of broilers. *Journal of Advanced Veterinary Research*. 2025;15(4):448-455.
10. Hatab MH, Badran AMM, Elaroussi MA, Rashad E, Taleb AMA, Elokil AA. Effect of zinc oxide nanoparticles as feed additive on blood indices, physiological, immunological responses, and histological changes in broiler chicks. *Biol Trace Elem Res*. 2024;202(5):2279-2293. doi: 10.1007/s12011-023-03820-y
11. Ferrie S, Tsang E. Monitoring nutrition in critical illness: what can we use? *Nutr Clin Pract*. 2018;33(1):133-146. doi: 10.1177/0884533617706312
12. Paulus MC, Melchers M et al. The urea-to-creatinine ratio as an emerging biomarker in critical care: a scoping review and meta-analysis. *Critical Care*. 2025;29:175. <https://doi.org/10.1186/s13054-025-05396-6>
13. Saber HS, Alian HA. Nano zinc oxide improves growth rate, carcass traits, meat chemical composition, serum and tissue mineral profiles, mineral retention, and intestinal morphology in broiler chickens compared to inorganic and organic zinc. *Biol Trace Elem*. 2026;204:909-924. <https://doi.org/10.1007/s12011-025-04716-9>
14. Semikolenova O, Sakovina L, Akhmetova E, Kim D, Vokhtantsev I, Golyshev V, Vorobyeva M, Novopashin S, Novopashina D. Photoactivatable nanoCRISPR/Cas9 system based on crRNA reversibly immobilized on carbon nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(20):10919. doi: 10.3390/ijms222010919
15. Sizova E, Miroshnikov S, Lebedev S, Usha B, Shabunin S. Use of nanoscale metals in poultry diet as a mineral feed additive. *Animal Nutrition*. 2020;6(2):185-191. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2019.11.007>
16. Zhang Z, Ho KM, Gu H, Hong Y, Yu Y. Defining persistent critical illness based on growth trajectories in patients with sepsis. *Crit Care*. 2020;24(1):57. doi: 10.1186/s13054-020-2768-z

Информация об авторах:

Алексей Петрович Тузиков, младший научный сотрудник института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, тел.: 8 (3532) 77-67-70.

Сергей Александрович Мирошников, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ректор, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, тел.: 8 (3532) 77-67-70.

Ольга Вилориевна Кван, доктор биологических наук, профессор кафедры машин и процессов химических и биотехнологических производств, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, тел.: 89225485657.

Information about the authors:

Alexey P Tuzikov, Junior Researcher at the Institute of Bioelementology, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 460018, Orenburg, Pobedy Ave., 13, tel.: 8 (3532) 77-67-70.

Sergey A Miroshnikov, Dr. Sci. (Biology), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Rector, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8 (3532) 77-67-70.

Olga V Kvan, Dr. Sci. (Biology), Professor of the Department of Machines and Processes of Chemical and Biotechnological Industries, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy ave., Orenburg, 460018, tel.: 89225485657.

Статья поступила в редакцию 10.07.2026; одобрена после рецензирования 14.08.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was submitted 10.07.2026; approved after reviewing 14.08.2026; accepted for publication 14.09.2026.