

УДК 636.4.085.1:591.1:577.3

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-406-05-65-71

К.С. Остренко**Р.В. Некрасов** ✉**Н.В. Боголюбова**

Федеральный исследовательский
центр животноводства — ВИЖ
им. академика Л.К. Эрнста,
пос. Дубровицы, Московская обл.,
Россия

✉ nek_roman@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.02.2026

Одобрена после рецензирования: 15.04.2026

Принята к публикации: 28.04.2026

© Остренко К.С., Некрасов Р.В.,
Боголюбова Н.В.

Антиоксидантный статус организма свиней при скармливании комбикормов с мукой из личинок *Hermetia Illucens*

РЕЗЮМЕ

Цель исследования — оценить влияние включения муки из личинок *Hermetia illucens* и рыбной муки в низкопротеиновый рацион на антиоксидантный статус и маркеры окислительного стресса у свиней.

Эксперимент проведен на 24 свиньях, разделенных на 3 группы по 8 голов. Контрольная группа получала низкопротеиновый комбикорм. Животным 1-й опытной группы в рацион дополнительно включали 3% муки из личинок *Hermetia illucens*, 2-й опытной — 3% рыбной муки. В конце опыта в сыворотке крови определяли концентрацию общих тиолов (SH), дисульфидов (SS), малонового диальдегида (МДА) и активность супероксиддисмутазы (СОД) с использованием коммерческих иммуноферментных наборов. Рассчитывали редокс-индекс (SH/SS).

В контрольной группе на фоне ограниченного по протеину кормления выявлены признаки умеренного окислительного стресса (повышенный МДА). Включение муки из личинок *H. illucens* привело к наиболее выраженным позитивным изменениям: уровни МДА и СОД снизились на 33,2 и 14,4% ($p < 0,05$), соответственно, концентрация SS — на 15,6% ($p < 0,05$) при росте SH на 4,1% ($p < 0,05$), что повысило редокс-индекс на 23,2% ($p < 0,05$). В группе с рыбной мукой также отмечено достоверное, но менее выраженное улучшение показателей: снижение МДА на 14,1% и рост SH/SS на 11,8% при отсутствии изменений активности СОД. Мука из личинок черной львинки может являться не только альтернативой рыбной муке при балансировании рациона по протеину, но и проявлять антиоксидантный эффект. Выявленные отдельные эффекты снижения окислительного стресса при использовании муки из личинок черной львинки необходимо уточнить в производственных испытаниях при масштабировании опыта, что позволит рекомендовать ее в качестве функциональной кормовой добавки в дальнейшем.

Ключевые слова: подсосники, *H. Illucens*, рыбная мука, антиоксидантный статус, редокс потенциал

Для цитирования: Остренко К.С., Некрасов Р.В., Боголюбова Н.В. Антиоксидантный статус организма свиней при скармливании комбикормов с мукой из личинок *Hermetia Illucens*. *Аграрная наука*. 2026; 406(05): 65–71.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-406-05-65-71>

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2026-406-05-65-71

Konstantin S. Ostrenko**Roman V. Nekrasov** ✉**Nadezhda V. Bogolyubova**

L.K. Ernst Federal Research Center for
Animal Husbandry, Dubrovitsy, Podolsk
Municipal District, Moscow Region,
Russia

✉ nek_roman@mail.ru

Received by the editorial office: 05.02.2026

Accepted in revised: 15.04.2026

Accepted for publication: 28.04.2026

© Ostrenko K.S., Nekrasov R.V.,
Bogolyubova N.V.

Antioxidant status of pigs fed compound feeds containing *Hermetia illucens* larvae meal

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the effects of dietary inclusion of *Hermetia illucens* larvae meal and fishmeal in a low-protein diet on the antioxidant status and oxidative stress markers in pigs.

The experiment was conducted on 24 pigs divided into 3 groups of 8 animals each. The control group received a basal low-protein compound feed (CP). Animals in the first experimental group were fed a diet supplemented with 3% *Hermetia illucens* larvae meal, while the second experimental group received 3% fishmeal. At the end of the experiment, serum concentrations of total thiols (SH), disulfides (SS), malondialdehyde (MDA), and superoxide dismutase (SOD) activity were determined using commercial enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) kits. The redox index (SH/SS ratio) was calculated.

In the control group, under protein-restricted feeding, signs of moderate oxidative stress were detected (elevated MDA). The inclusion of *Hermetia illucens* larvae meal led to the most pronounced positive changes: MDA and SOD levels decreased by 33.2% and 14.4% ($p < 0,05$), respectively; the SS concentration decreased by 15.6% ($p < 0,05$), while SH increased by 4.1 % ($p < 0,05$), which raised the redox index by 23.2% ($p < 0,05$). In the fishmeal group, a significant but less pronounced improvement in parameters was also observed: a 14.1% decrease in MDA and an 11.8% increase in the SH/SS ratio, with no changes in SOD activity. *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae meal can not only serve as an alternative to fishmeal for balancing the diet in terms of protein, but also exert an antioxidant effect. The observed individual effects of reducing oxidative stress when using black soldier fly larvae meal need to be confirmed in production trials during scale-up, which will allow it to be recommended as a functional feed additive in the future.

Key words: pigs, *H. Illucens*, fish meal, antioxidant status, redox potential

For citation: Ostrenko K.S., Nekrasov R.V., Bogolyubova N.V. Antioxidant status of pigs fed compound feeds containing *Hermetia illucens* larvae meal. *Agrarian science*. 2026; 406(05): 65–71 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-406-05-65-71>

Введение/Introduction

Интенсификация животноводства и повышение продуктивности сельскохозяйственных животных сопровождаются ростом метаболической нагрузки на организм, что может приводить к усилению окислительного стресса [1–3]. Данное состояние, характеризующееся дисбалансом между образованием активных форм кислорода (АФК) и активностью антиоксидантной системы, негативно сказывается на основных физиологических показателях, иммунном статусе и репродуктивной функции у свиней [4].

Научную и практическую ценность представляет новый ингредиент — мука из личинок *Hermetia illucens* (чёрная львинка). Данный продукт позиционируется не просто как альтернативный источник белка и эссенциальных аминокислот с высоким коэффициентом переваримости, но и как биологическая матрица, обладающая выраженным антиоксидантным потенциалом. Наличие в ее составе комплекса вторичных метаболитов и биоактивных пептидов позволяет рассматривать данный кормовой ингредиент, как многофункциональный компонент, способный одновременно выполнять пластическую, энергетическую и протекторную функции в кормлении свиней [5, 6]. Центральным компонентом, определяющий данный биологический эффект, является лауриновая кислота (C12:0), содержание которой в липидах личинок может достигать 40–60%. Помимо известных антимикробных свойств, лауриновая кислота демонстрирует выраженную антиоксидантную активность [7]. Представленная жирная кислота позволяет ингибировать процессы перекисного окисления липидов в клеточных мембранах, защищая их целостность и функциональность, а также опосредованно влияя на активность ключевых антиоксидантных ферментов, таких как супероксиддисмутаза, каталаза и глутатионпероксидаза [8,9]. Хитин и его производные (хитозан) обладают хелатирующими свойствами в отношении ионов металлов с переменной валентностью (Fe, Cu), катализирующих образование АФК, а также способны непосредственно нейтрализовать свободные радикалы [10–13]. Антимикробные пептиды (дефензины, цекропины), синтезируемые личинками, помимо прямой защиты от патогенов, могут снижать уровень воспаления, являющегося мощным источником окислительного стресса. Микроэлементы-кофакторы (селен, цинк, медь), необходимые для синтеза и работы эндогенных антиоксидантных ферментов [14–17].

Таким образом, включение муки из личинок черной львинки в комбикорма для свиней представляет собой стратегию многофакторного усиления антиоксидантной системы организма. Подобранный подход может быть более эффективным

по сравнению с использованием отдельных синтетических антиоксидантов, так как предполагает комбинированное действие различных природных соединений с разными механизмами защиты.

Цель исследования — изучить влияние скормливания комбикормов с мукой из личинок *Hermetia illucens* на антиоксидантный статус организма свиней в сравнении с рыбной мукой на фоне рациона кормления с низким содержанием сырого протеина.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Эксперимент проведен в 2024 году на 24 головах помесных боровков (F-1: Дюрок х Ландрас) с начальной живой массой 17–21 кг, приобретенных в ООО «ЭКО ФЕРМА «Климовская» (Калужская обл., Боровский район, дер. Климовское). По принципу пар-аналогов (на основе возраста и живой массы) было сформировано 3 группы животных, по 8 голов в каждой. Продолжительность исследования составила 35 суток.

Опыт проводили по стандартам GLP и положениям Хельсинкской декларации¹, а также законодательства РФ².

Животные находились в специализированном производственном помещении, оснащенном всеми необходимыми инструментами и оборудованием для раздачи кормов. Животные содержались в секциях (2,5 x 3,5 м) по 8 голов в каждой. Условия содержания обеспечивали постоянный доступ к рациону питания и чистой питьевой воде на весь период эксперимента. Уход за животными и условия их содержания строго соответствовали установленным нормам — температурный режим, влажность, освещение и воздухообмен поддерживались в рамках требований ветеринарии и гигиены. Схема опыта представлена в табл. 1.

Согласно данным, уровень содержания сырого протеина более 18% в 1 кг сухого корма обеспечивает высокий уровень приростов свиней в период доращивания [18]. Для сравнительного опыта использовали контрольную группу поросят (отрицательный контроль) в период доращивания, кормление которых осуществляли рационом с пониженным содержанием сырого протеина

Таблица 1. Схема проведения физиологических исследований

Table 1. The scheme of physiological research

Группа	Голов в группе	Характеристика кормления
Контрольная	8	Низкопротеиновый комбикорм по рецепту 1 (содержание СП 163,5 г/кг комбикорма)
1-опытная	8	Комбикорм по рецепту 2 (содержание СП 181,4 г/кг комбикорма)
2-опытная	8	Комбикорм по рецепту 3 (содержание СП 181,9 г/кг комбикорма)

¹ Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных, используемых в научных целях. https://ruslasa.ru/wp-content/uploads/2017/06/Directive_201063_rus.pdf

² Федеральный закон от 27.12.2018 № 498-ФЗ (ред. от 24.07.2023) «Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

на уровне 163,5 г/кг, обеспечивающего средний уровень приростов живой массы тела, что является ограничением для данного эксперимента. Аналогом из 2-й опытной группы задавали свиной комбикорм по рецепту 2, в состав которого дополнительно вносили 3% муки из личинок черной львинки для повышения уровня СП до 181 г/кг комбикорма. Мука была приготовлена с использованием личинок черной львинки, полученных в условиях отдела кормления сельскохозяйственных животных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им Л.К. Эрнста и содержала в своем составе не менее 55% СП. Поросята 3-й опытной группы получали комбикорм по рецепту 3, в который дополнительно включали 3% рыбной муки (табл. 2)

Таким образом, состав комбикорма для контрольной группы был дефицитным по сырому протеину, составы комбикормов для поросят опытных групп (1 и 2) соответствовали по показателям питательной ценности требованиям для данного возрастного периода и весовых показателей животных для получения высоких уровней приростов [18].

В период опыта проводился индивидуальный учет показателей роста животных. Для определения приростов живой массы (абсолютного (АП, кг), среднесуточного (ССП, г) в начале и в конце опытного периода проводили индивидуальное взвешивание животных (в утренние часы) на электронных весах «Реус-А» (ООО «Тензосила», Россия, III класс точности, СИ поверены).

В конце периода дорастивания у животных были отобраны образцы крови из яремной вены ($n = 8$). Отбор крови осуществляли утром из яремной вены в вакуумные пробирки (IMPROVACUTER, Китай) объемом 6 мл (с активатором свертывания). После взятия биоматериала немедленно охлаждали до +4 °С в холодильнике медицинском «Енисей» («ДАР-МЕДИКАЛ», Россия) для замедления метаболических процессов и окислительных реакций *ex vivo*.

Для получения сыворотки охлажденную кровь центрифугировали на лабораторной центрифуге LC-04A («Армед», Россия) при температуре +4 °С. Использовали 1500–3000 г в течение 10–15 минут. Полученную сыворотку аккуратно отбирали в микропробирки типа Эппендорф объемом 2 мл. Образцы замораживали и хранили при температуре -18 °С в биомедицинском морозильнике DW-40L262 (Haier, Китай) до момента проведения биохимического анализа. Размораживание образцов проводили однократно при комнатной температуре непосредственно перед исследованием.

Концентрацию исследуемых маркеров в сыворотке крови проводили на планшетном ридере «Униплан АИФР-01» («Спекс», Россия) согласно протоколам производителей. Длины волн для каждого теста устанавливали в соответствии

Таблица 2. Состав комбикормов для свиней подопытных групп³

Table 2. Composition of compound feed for experimental groups of pigs³

Компонент, %	Рецепт комбикорма ¹		
	№1	№2	№3
Пшеница	25,000	24,230	24,230
Отруби пшеничные	20,860	20,210	20,210
Ячмень	20,000	19,380	19,380
Кукуруза	13,000	12,600	12,600
Жмых подсолнечный	15,000	14,540	14,540
Дрожжи кормовые	3,000	2,900	2,900
Соль поваренная	0,420	0,420	0,420
Монокальцийфосфат	0,220	0,220	0,220
Известняковая мука	1,300	1,300	1,300
Премикс КС-4	1,000	1,000	1,000
Монохлоргидрат лизина	0,200	0,200	0,200
Мука из личинок черной львинки	–	3,000	–
Рыбная мука	–	–	3,000

с требованиями инструкции к набору (с референс-волной 400–550 нм в зависимости от детекции).

Общие сульфгидрильные группы (SH), набор «Total Sulfhydryl (SH) Groups Assay Kit (Colorimetric)» (BioVision, США). Принцип метода: реакция SH-групп с 5,5'-дителиобис-(2-нитробензойной кислотой) (DTNB) с образованием продукта, имеющего максимум поглощения при 412 нм.

Дисульфидные связи (SS) — набор «Disulfide (SS) Assay Kit» (BioVision, США). Метод основан на восстановлении дисульфидных связей с последующим детектированием SH-групп по реакции с DTNB. Расчет содержания SS выполняли по разности между общим количеством SH-групп после восстановления и исходным уровнем SH максимум поглощения при 450 нм.

Малоновый диальдегид (МДА) — набор «Malondialdehyde (MDA) ELISA Kit» (MyBioSource, США). Реакция МДА с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) при высокой температуре и кислом pH с образованием окрашенного комплекса (ТБК-активные продукты). Измерение проводили при длине волны 532 нм.

Супероксиддисмутаза (СОД) — набор для измерения активности «Superoxide Dismutase (SOD) Activity Assay Kit» (Cayman Chemical, США). Метод основан на использовании ксантина и ксантиноксидазы для генерации супероксид-анионов, которые восстанавливают тетразолиевую соль до формазана. Активность СОД оценивали по степени ингибции этого восстановления; детекция при 450 нм.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программного обеспечения Statistica 8.0. Результаты представлены как среднее арифметическое $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$). Критический уровень значимости принимали равным $p < 0,05$.

³ Некрасов Р.В., Головин А.В., Махаев Е.А., Аникин А.С., Первов Н.Г., Стрекозов Н.И., Мысик А.Т., Дуборезов В.М., Чабаяев М.Г., Фомичев Ю.П., Гусев И.В. Нормы потребностей молочного скота и свиней в питательных веществах: монография. М., 2018

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В ходе исследования было выявлено, что доп.полнение уровня протеина в рационе с 163,5 до нормы (по факту 181,4–181,9 г/кг комбикорма) оказывает положительное влияние не только на рост животных, но и модулирующее влияние на прооксидантно-антиоксидантный баланс организма свиней, что проявилось в изменении изучаемых в сыворотке крови показателей при введении высокопротеиновых компонентов (муки из личинок *Hermetia illucens* и рыбной муки) в низкопротеиновый комбикорм (табл. 3).

Полученные в исследовании данные демонстрируют, что восполнение уровня сырого протеина в рационе свиней до требуемой нормы (не менее 18% в сухом корме) путем включения 3% муки из личинок *Hermetia illucens* оказывает выраженное модулирующее влияние на систему «прооксиданты-антиоксиданты», эффективно нивелируя проявления окислительного стресса, индуцированного низкопротеиновым рационом. Одним из основных эффектов применения изучаемой кормовой добавки является комплексное улучшение тиол-дисульфидного статуса и снижение уровня малонового диальдегида (МДА), что согласуется с современными представлениями о роли тиол-дисульфидного гомеостаза как интегрального маркера метаболического здоровья животных [19].

Дополнение состава рациона 3% муки из личинок *Hermetia illucens* (опытная группа 1) оказало выраженное модулирующее действие на антиоксидантную систему организма свиней. Добавка проявила себя не просто как восполняющая норму потребности свиней в содержании протеина, но и как стимулятор отдельных звеньев защиты, как фактор, комплексно смещающий физиологическое состояние животных в сторону значительного снижения общей окислительной нагрузки. Наиболее ярким свидетельством этого является достоверное ($p < 0,05$) снижение уровня МДА на 33,2%, что указывает на эффективное ингибирование цепных реакций ПОЛ. Этот эффект является прямым следствием уникального состава муки, в частности, высокого содержания лауриновой кислоты, которая, интегрируясь в липидный бислой клеточных мембран, повышает их структурную устойчивость к окислению, а также наличия хитина/хитозана, способных к хелатированию ионов переходных металлов, катализирующих свободнорадикальные процессы, как указывают ряд источников [14, 15].

Выявленное в контрольной группе смещение баланса в сторону окисленных форм (снижение SH/SS) является классическим признаком оксидативного стресса, развивающегося на фоне аминокислотного дисбаланса. Как показано в работах Szczepaniak и др. [20], именно тиол-дисульфидная система (TDH) выступает наиболее чувствительным индикатором стресс-индуцированных изменений у свиней. Дефицит серосодержащих

Таблица 3. Показатели антиоксидантного статуса свиней ($M \pm m$, $n = 8$)

Table 3. Indicators of antioxidant status of pigs ($M \pm m$, $n = 8$)

Показатель	Группа		
	Контроль	1-опытная	2-опытная
SH (мкмоль/л)	$0,73 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,01^*$	$0,74 \pm 0,02$
SS (мкмоль/л)	$0,32 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,02^*$	$0,29 \pm 0,02$
SH/SS	$2,28 \pm 0,11$	$2,81 \pm 0,09^*$	$2,55 \pm 0,13$
МДА (нмоль/л)	$14,14 \pm 0,12$	$9,44 \pm 0,10^*$	$12,14 \pm 0,18^*$
СОД (мкмоль/мл)	$786,60 \pm 23,36$	$673,00 \pm 15,10^*$	$768,0 \pm 33,67$

Примечание: достоверно при $* p < 0,05$

аминокислот (метионина, цистеина) в низкопротеиновых рационах лимитирует синтез восстановленного глутатиона (GSH), что неизбежно ведет к накоплению дисульфидов (SS) и падению редокс-индекса. В нашем исследовании, введение муки, полученной из личинки *Hermetia illucens*, достоверно снизило уровень SS на 15,6% и повысило SH/SS на 23,2%, что свидетельствует о восстановлении пула эндогенных тиолов. Это коррелирует с данными Ушакова и др. [21], показавшими, что гидролизаты *Hermetia illucens* обладают мощным цитопротекторным действием, напрямую повышая уровень восстановленного глутатиона в клетках печени.

Эффективность добавки именно на уровне ингибирования перекисного окисления липидов (снижение МДА на 33,2%) объясняется синергизмом нескольких биоактивных компонентов, присутствующих в личинках. Во-первых, жирнокислотный профиль: наличие лауриновой кислоты (C12:0) повышает структурную стабильность мембран, снижая их уязвимость для атаки свободными радикалами. Во-вторых, хитин и хитозан, входящие в состав экзоскелета, обладают выраженными хелатирующими свойствами в отношении ионов Fe^{2+} и Cu^{2+} , которые являются классическими прооксидантами, катализирующими реакции Фентона [19].

Позитивные сдвиги были зафиксированы и в системе тиол-дисульфидного гомеостаза. Установлено достоверное снижение ($p < 0,05$) уровня дисульфидов (SS) на 15,6% на фоне роста концентрации свободных тиолов (SH) на 4,1% привело к резкому увеличению (на 23,2%) интегрального редокс-индекса (SH/SS). Данное изменение отражает смещение редокс-баланса плазмы крови в восстановительную сторону, свидетельствуя о повышении резерва восстановленного глутатиона и снижении уровня окисленных белковых структур.

В традиционной интерпретации высокий уровень СОД рассматривается как защитная реакция на избыток супероксид-аниона ($O_2^{\cdot-}$). Однако, как отмечает Chia и др., в условиях эффективного антиоксидантного статуса снижение активности СОД свидетельствует об улучшении физиологического состояния, поскольку снижается субстратная нагрузка на фермент (уменьшается генерация $O_2^{\cdot-}$ в митохондриях), что подтверждается низким

уровнем МДА. Если бы стресс сохранялся, активность СОД оставалась бы высокой или возрастала компенсаторно. В этих же исследованиях также было показано, что добавление *Hermetia illucens* в рацион поросят в условиях плохой санитарии приводило к нормализации антиоксидантных ферментов, включая СОД и глутатионпероксидазу, что коррелирует с полученными данными о снижении уровня окислительного стресса [22].

Во второй опытной группе, получавшей 3% рыбной муки, наблюдалась аналогичная, но статистически менее выраженная тенденция улучшения антиоксидантного статуса. Зафиксировано достоверное снижение ($p < 0,05$) МДА на 14,1% и повышение редокс-индекса SH/SS на 11,8%. Однако отсутствие значимых изменений в активности СОД, по сравнению с контролем, указывает на то, что оксидативная нагрузка в этой группе оставалась более высокой, а антиоксидантная система продолжала функционировать в режиме компенсаторной активации. Это может быть связано с двойственной ролью длинноцепочечных омега-3 полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), содержащихся в рыбной муке: с одной стороны, они служат субстратом для синтеза противовоспалительных медиаторов, но с другой, из-за высокой степени ненасыщенности сами являются уязвимой мишенью для ПОЛ, что требует от организма дополнительных ресурсов для их защиты.

В ходе проведенных исследований было установлено, что применение муки из личинки черной львинки в составе комбикорма для поросят на доращивании способствует более выраженной реализации генетического потенциала продуктивности (табл. 4).

Так, в 1-й опытной группе (3% муки из личинок *Hermetia illucens*) абсолютный прирост составил 21,63 кг, что на 9,9% ($p < 0,05$) выше контроля; во 2-й опытной группе (3% рыбной муки) — 21,96 кг (+11,5%, $p < 0,05$). Среднесуточный прирост в контрольной группе находился на уровне 530 г/сут., тогда как в 1-й опытной группе он достиг 618 г/сут. (+16,6%), а во 2-й — 627 г/сут. (+18,3%, $p < 0,05$). Живая масса в конце опыта в опытных группах превысила контроль на 10,2–10,9%.

Таблица 4. Зоотехнические показатели поросят в период опыта ($M \pm m$, $n = 8$)

Table 4. Zootechnical indicators of pigs during the experiment period ($M \pm m$, $n = 8$)

Показатель	Группа		
	контрольная	1-опытная	2-опытная
Дней опыта	Период — 35 суток, в том числе уравнильный период 10 суток		
Живая масса в начале опыта, кг	19,3±1,3	19,4±1,2	19,3±1,4
Живая масса в конце периода, кг	39,0±4,17	41,03±2,51	41,26±3,98
Абсолютный прирост живой массы, кг	19,68±1,40	21,63±0,27*	21,96±0,55*
Среднесуточный прирост, г	530 ± 50	618 ± 42	627 ± 51*
Живая масса в % к контролю	100,0	110,2	110,9

Примечание: достоверно при * $p < 0,05$ к контролю

Выявленные различия в продуктивности не могут быть объяснены исключительно уровнем протеина и аминокислотным профилем кормов, поскольку содержание сырого протеина в рационах животных опытных групп было выровнено. Следовательно, в основе наблюдаемого эффекта лежат метаболические механизмы, связанные с модуляцией прооксидантно-антиоксидантного баланса.

В таблице 3 было показано, что включение муки из личинок *Hermetia illucens* в рацион сопровождается изменением редокс потенциала у свиней. Снижение хронического оксидативного стресса является ключевым фактором, лимитирующим скорость роста у свиней. Оксидативный стресс индуцирует катаболизм белков, снижает эффективность использования аминокислот и ухудшает энергетический метаболизм митохондрий [19]. В условиях дефицита серосодержащих аминокислот (контрольная группа) происходит накопление дисульфидов (SS), что нарушает работу ключевых ферментов дыхательной цепи и снижает синтез АТФ. Напротив, восстановление редокс-гомеостаза в опытных группах позволило перенаправить метаболические ресурсы с антиоксидантной защиты на анаболические процессы — синтез белка и аккумуляцию роста мышечной массы, что подтверждает разница в продуктивности между 1-й и 2-й опытными группами на уровне тенденции.

Мука из личинки *Hermetia illucens* представляет собой не просто альтернативный источник протеина, но функциональный ингредиент, который за счет антиоксидантных свойств (хитозан, лауриновая кислота) снижает метаболическую «цену» роста, высвобождая ресурсы для анаболизма. Полученные данные согласуются с выводами ряда исследований [23, 24], в которых также показана положительная корреляция между улучшением антиоксидантного статуса и продуктивностью свиней при использовании альтернативных источников протеина.

По результатам взвешивания в конце опыта наблюдалась тенденция к увеличению живой массы поросят опытных групп: среднесуточный прирост у животных во 1-й опытной группы за весь период был выше на 9,9 %, во 2-й опытной группе — на 10,9% по сравнению с аналогами из контрольной группы. На момент окончания исследования абсолютный прирост поросят опытных групп был выше на 9,9 и 11,5% ($p < 0,05$, соответственно, по сравнению с показателями в контрольной группе. Полученные данные подтверждают, что животные опытных групп лучше использовали питательные вещества корма на прирост живой массы тела. Также установлено, что использование муки из личинок черной львинки может служить альтернативой традиционным компонентам животного происхождения, в частности рыбной муке.

Выводы/Conclusions

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что мука из личинок черной львинки может являться не просто альтернативным источником протеина, а функциональной кормовой добавкой с антиоксидантным потенциалом, превосходящим по эффективности традиционно применяемую в рецептах комбикормов рыбную муку в условиях моделированного нутритивного стресса. Включение 3% муки из личинок черной львинки в рацион поросят в период докармливания не только компенсировало дефицит

белка, как и в группе с рыбной мукой, но повышало резистентность животных к оксидативному стрессу, вызванному низким по сырому протеину уровнем кормления. Это может транслироваться в улучшении здоровья, снижении падежа, усилении иммунного ответа и, в конечном итоге, в лучшие производственные показатели и качество продукции (за счет снижения окисления липидов *post mortem*), что планируется установить в дальнейших исследованиях при масштабировании применения муки из черной львинки в производственных условиях выращивания свиней.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках выполнения гранта Российского научного фонда № 24-16-00021

FUNDING

The research was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 24-16-00021

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Szczepanik K., Furgał-Dierżuk I., Gala Ł., Świątkiewicz M. Effects of *Hermetia illucens* Larvae Meal and Astaxanthin as Feed Additives on Health and Production Indices in Weaned Pigs. *Animals*. 2023; 13(1): 163. <https://doi.org/10.3390/ani13010163>
2. Aprianto M.A., Muhlisin, Kurniawati A., Hanim C., Ariyadi B., Anas M.A. Effect supplementation of black soldier fly larvae oil (*Hermetia illucens* L.) calcium salt on performance, blood biochemical profile, carcass characteristic, meat quality, and gene expression in fat metabolism broilers. *Poultry Science*. 2023; 102(10): 102984. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102984>
3. Haak L., De Smet S., Fremaut D., Van Walleghe K., Raes K. Fatty acid profile and oxidative stability of pork as influenced by duration and time of dietary linseed or fish oil supplementation. *Journal of Animal Science*. 2008; 86(6): 1418–1425. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0032>
4. Burnett D.D., Legako J.F., Phelps K.J., Gonzalez J.M. Biology, strategies, and fresh meat consequences of manipulating the fatty acid composition of meat. *Journal of Animal Science*. 2020; 98(2): skaa033. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa033>
5. Dabbou S. et al. Black soldier fly defatted meal as a dietary protein source for broiler chickens: Effects on growth performance, blood traits, gut morphology and histological features. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2018; 9: 49. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0266-9>
6. Noh S., Jin X., Jang M., Park M., Kim Y. Supplementation of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) as a sustainable protein source on growth performance, blood profiles, immune response, and diarrhea incidence in weaning pigs. *Animal Bioscience*. 2026; 39(2): 250425. <https://doi.org/10.5713/ab.25.0425>
7. Zhu M. et al. Growth Performance and Meat Quality of Growing Pigs Fed with Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae as Alternative Protein Source. *Processes*. 2022; 10(8): 1498. <https://doi.org/10.3390/pr10081498>
8. Anuar N.S. et al. Lauric acid improves hormonal profiles, antioxidant properties, sperm quality and histomorphometric changes in testis and epididymis of streptozotocin-induced diabetic infertility rats. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2023; 470: 116558. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116558>
9. Spranghers T. et al. Gut antimicrobial effects and nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) prepupae for weaned piglets. *Animal Feed Science and Technology*. 2018; 235: 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2017.08.012>
10. Pestov A., Bratskaya S. Chitosan and Its Derivatives as Highly Efficient Polymer Ligands. *Molecules*. 2016; 21(3): 330. <https://doi.org/10.3390/molecules21030330>
11. Bharathi V.U., Thambidurai S. Phytosynthesis of biocompatible chitosan-based ZnO nanocomposite aided by *Cissus quadrangularis* extract enriched with antimicrobial and antioxidant potential. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024; 271(2): 132677. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132677>

REFERENCES

1. Szczepanik K., Furgał-Dierżuk I., Gala Ł., Świątkiewicz M. Effects of *Hermetia illucens* Larvae Meal and Astaxanthin as Feed Additives on Health and Production Indices in Weaned Pigs. *Animals*. 2023; 13(1): 163. <https://doi.org/10.3390/ani13010163>
2. Aprianto M.A., Muhlisin, Kurniawati A., Hanim C., Ariyadi B., Anas M.A. Effect supplementation of black soldier fly larvae oil (*Hermetia illucens* L.) calcium salt on performance, blood biochemical profile, carcass characteristic, meat quality, and gene expression in fat metabolism broilers. *Poultry Science*. 2023; 102(10): 102984. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102984>
3. Haak L., De Smet S., Fremaut D., Van Walleghe K., Raes K. Fatty acid profile and oxidative stability of pork as influenced by duration and time of dietary linseed or fish oil supplementation. *Journal of Animal Science*. 2008; 86(6): 1418–1425. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0032>
4. Burnett D.D., Legako J.F., Phelps K.J., Gonzalez J.M. Biology, strategies, and fresh meat consequences of manipulating the fatty acid composition of meat. *Journal of Animal Science*. 2020; 98(2): skaa033. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa033>
5. Dabbou S. et al. Black soldier fly defatted meal as a dietary protein source for broiler chickens: Effects on growth performance, blood traits, gut morphology and histological features. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2018; 9: 49. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0266-9>
6. Noh S., Jin X., Jang M., Park M., Kim Y. Supplementation of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) as a sustainable protein source on growth performance, blood profiles, immune response, and diarrhea incidence in weaning pigs. *Animal Bioscience*. 2026; 39(2): 250425. <https://doi.org/10.5713/ab.25.0425>
7. Zhu M. et al. Growth Performance and Meat Quality of Growing Pigs Fed with Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae as Alternative Protein Source. *Processes*. 2022; 10(8): 1498. <https://doi.org/10.3390/pr10081498>
8. Anuar N.S. et al. Lauric acid improves hormonal profiles, antioxidant properties, sperm quality and histomorphometric changes in testis and epididymis of streptozotocin-induced diabetic infertility rats. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2023; 470: 116558. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116558>
9. Spranghers T. et al. Gut antimicrobial effects and nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) prepupae for weaned piglets. *Animal Feed Science and Technology*. 2018; 235: 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2017.08.012>
10. Pestov A., Bratskaya S. Chitosan and Its Derivatives as Highly Efficient Polymer Ligands. *Molecules*. 2016; 21(3): 330. <https://doi.org/10.3390/molecules21030330>
11. Bharathi V.U., Thambidurai S. Phytosynthesis of biocompatible chitosan-based ZnO nanocomposite aided by *Cissus quadrangularis* extract enriched with antimicrobial and antioxidant potential. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024; 271(2): 132677. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132677>

12. Jasińska J.M., Kamińska I., Chmiel M.J., Jamróz E. Biological potential of polysaccharides extracted from *Nostoc* colonies for film production — Physical and biological properties. *Biotechnology Journal*. 2023; 18(5): e2200455. <https://doi.org/10.1002/biot.202200455>
13. Franco A, et al. Antimicrobial activity of lipids extracted from *Hermetia illucens* reared on different substrates. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2024 Jan 23; 108(1): 167. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13005-9>.
14. Liu Y.-Q., Song Q.-W., Mo C.-R., Yu W.-W., Hu C.-Y. Effect of neutralization treatment on properties of chitosan/bamboo leaf flavonoids/nano-metal oxide composite films and application of films in antioxidation of rapeseed oil. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 242(3): 124951. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124951>
15. Benzerthi A. et al. Insect Fat in Animal Nutrition — A Review. *Annals of Animal Science*. 2020; 20(4): 1217–1240. <https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0076>
16. Crosbie M., Zhu C., Karrow N.A., Huber L.-A. The effects of partially replacing animal protein sources with full fat black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens*) in nursery diets on growth performance, gut morphology, and immune response of pigs. *Translational Animal Science*. 2021; 5(2): txab057. <https://doi.org/10.1093/tas/txab057>
17. Yu M., Li Z., Chen W., Rong T., Wang G., Ma X. *Hermetia illucens* larvae as a potential dietary protein source altered the microbiota and modulated mucosal immune status in the colon of finishing pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019; 10: 50. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0358-1>
18. Некрасов Р.В., Головин А.В., Махаев Е.А. (ред.). Нормы потребностей молочного скота и свиней в питательных веществах. Монография. М.: ФНЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. 2018; 289. ISBN 978-5-906906-77-9 EDN XLVDM
19. Семенова А.А., Кузнецова Т.Г., Насонова В.В., Некрасов Р.В., Боголюбова Н.В., Цис Е.Ю. Использование антиоксидантов в качестве адаптогенов для свиней (*Sus scrofa domestica* Erxleben, 1777) (мета-анализ). *Сельскохозяйственная биология*. 2020; 55(6): 1107–1125. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.6.1107rus>
20. Szczepanik K, Furgał-Dierżuk I, Gala Ł, Świątkiewicz M. Effects of *Hermetia illucens* Larvae Meal and Astaxanthin as Feed Additives on Health and Production Indices in Weaned Pigs. *Animals*. 2023; 13(1): 163. <https://doi.org/10.3390/ani13010163>
21. Ушакова Н.А., Бродский Е.С., Коваленко А.А., Бастрakov А.И., Козлова А.А., Павлов Д.С. Особенности липидной фракции личинок черной львинки *Hermetia illucens*. *Доклады Академии наук*. 2016; 468(4): 462–465. <https://doi.org/10.7868/S0869565216160258>
22. Chia S.Y. et al. Effect of Dietary Replacement of Fishmeal by Insect Meal on Growth Performance, Blood Profiles and Economics of Growing Pigs in Kenya. *Animals*. 2019; 9(10): 705. <https://doi.org/10.3390/ani9100705>
23. Крючков И.А., Никишов А.А. Влияние белкового концентрата из личинок черной львинки *Hermetia illucens* на продуктивные показатели цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2025; (4): 108–112. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-108-112>
24. Шаабан М., Бельшккина М.Е. Нетрадиционные источники белка в кормлении животных. *Аграрная наука*. 2025; (3): 69–75 (на англ. яз.). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-69-75>

ОБ АВТОРАХ

Константин Сергеевич Остренко
доктор биологических наук, доцент
ostrenkoks@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2235-1701>

Роман Владимирович Некрасов
доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Российской академии наук
nek_roman@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4242-2239>

Надежда Владимировна Боголюбова
доктор биологических наук
652202@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0520-7022>

Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, поселок Дубровицы, дом 60, Городской округ Подольск, Московская область, 142132, Россия

12. Jasińska J.M., Kamińska I., Chmiel M.J., Jamróz E. Biological potential of polysaccharides extracted from *Nostoc* colonies for film production — Physical and biological properties. *Biotechnology Journal*. 2023; 18(5): e2200455. <https://doi.org/10.1002/biot.202200455>

13. Franco A, et al. Antimicrobial activity of lipids extracted from *Hermetia illucens* reared on different substrates. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2024 Jan 23; 108(1): 167. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13005-9>.

14. Liu Y.-Q., Song Q.-W., Mo C.-R., Yu W.-W., Hu C.-Y. Effect of neutralization treatment on properties of chitosan/bamboo leaf flavonoids/nano-metal oxide composite films and application of films in antioxidation of rapeseed oil. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 242(3): 124951. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124951>

15. Benzerthi A. et al. Insect Fat in Animal Nutrition — A Review. *Annals of Animal Science*. 2020; 20(4): 1217–1240. <https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0076>

16. Crosbie M., Zhu C., Karrow N.A., Huber L.-A. The effects of partially replacing animal protein sources with full fat black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens*) in nursery diets on growth performance, gut morphology, and immune response of pigs. *Translational Animal Science*. 2021; 5(2): txab057. <https://doi.org/10.1093/tas/txab057>

17. Yu M., Li Z., Chen W., Rong T., Wang G., Ma X. *Hermetia illucens* larvae as a potential dietary protein source altered the microbiota and modulated mucosal immune status in the colon of finishing pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019; 10: 50. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0358-1>

18. Nekrasov R.V., Golovin A.V., Makhaev E.A. (eds.). Norms of nutritional needs of dairy cattle and pigs. Monograph. Moscow: L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry. 2018; 289 (in Russian). ISBN 978-5-906906-77-9 EDN XLVDM

19. Semenova A.A., Kuznetsova T.G., Nasonova V.V., Nekrasov R.V., Bogolyubova N.V., Tsis E.Yu. Use of antioxidants as adaptogens fed to pigs (*Sus scrofa domestica* Erxleben, 1777) (meta-analysis). *Agricultural Biology*. 2020; 55(6): 1107–1125. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.6.1107eng>

20. Szczepanik K, Furgał-Dierżuk I, Gala Ł, Świątkiewicz M. Effects of *Hermetia illucens* Larvae Meal and Astaxanthin as Feed Additives on Health and Production Indices in Weaned Pigs. *Animals*. 2023; 13(1): 163. <https://doi.org/10.3390/ani13010163>

22. Ushakova N.A., Brodskii E.S., Kovalenko A.A., Bastrakov A.I., Kozlova A.A., Pavlov D.S. Characteristics of lipid fractions of larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016; 468(1): 209–212. <https://doi.org/10.1134/S1607672916030145>

23. Chia S.Y. et al. Effect of Dietary Replacement of Fishmeal by Insect Meal on Growth Performance, Blood Profiles and Economics of Growing Pigs in Kenya. *Animals*. 2019; 9(10): 705. <https://doi.org/10.3390/ani9100705>

24. Kryuchkov I.A., Nikisov A.A. Effect of protein concentrate from black soldier fly *Hermetia illucens* larvae on the productive performance of broiler chickens. *Agrarian science*. 2025; (4): 108–112 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-108-112>

25. Shaaban M., Belyshkina M.E. Non-traditional sources of protein in animal nutrition. *Agrarian science*. 2025; (3): 69–75. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-69-75>

ABOUT THE AUTHORS

Konstantin Sergeyevich Ostrenko
Doctor of Biological Sciences, Associate Professor
ostrenkoks@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2235-1701>

Roman Vladimirovich Nekrasov
Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences
nek_roman@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4242-2239>

Nadezhda Vladimirovna Bogolyubova
Doctor of Biological Sciences
652202@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0520-7022>

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, 60 Dubrovitsy, Podolsk Municipal District, Moscow Region, 142132 Russia