

ВЛИЯНИЕ БЕЛКОВОЙ ДОБАВКИ В РАЦИОНЕ ЛИЧИНОК *HERMETIA ILLUCENS* НА АККУМУЛЯЦИЮ БЕЛКА И ПРИРОСТ БИОМАССЫ

¹К.Г. Кузнецова, младший научный сотрудник

¹Е.В. Мечтаева, младший научный сотрудник

¹А.А. Мещеряков, кандидат химических наук, младший научный сотрудник

¹А.З. Журавлева, кандидат ветеринарных наук, заместитель директора

²А.Д. Чернов, заместитель руководителя

¹Г.П. Котова, лаборант-исследователь

¹В.Ю. Ситнов, директор

¹Д.С. Рябухин, кандидат химических наук, заведующий лабораторией

¹ВНИИ пищевых добавок – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Северо-Западная испытательная лаборатория, ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: k.kuznetsova@fncps.ru

Ключевые слова: личинки черной львинки, *Hermetia illucens*, биоконверсия, рацион кормления, накопление белка.

Реферат. С ростом объемов образования пищевых и сельскохозяйственных отходов возникает необходимость поиска новых способов их утилизации. Одной из перспективных технологий является биоконверсия отходов личинками мухи черной львинки (*Hermetia illucens*). Они способны трансформировать низкоценное сырье в богатую белком и жиром энтомологическую биомассу, которая может использоваться как сырье при производстве кормов для сельскохозяйственных животных, птицы и аквакультуры. Для совершенствования данной технологии и повышения ее эффективности необходимо проводить исследования в области подбора оптимальных рационов кормления личинок черной львинки. Целью настоящего исследования является анализ влияния высокобелковых экспериментальных рационов с добавлением рыбной муки (РМ) на аккумуляцию белка и жира в личинках, а также на прирост энтомологической биомассы и скорость достижения личинками предкукольной стадии. В рамках эксперимента смоделированы рационы из пшеничных отрубей с разным содержанием рыбной муки (РМ 5%; 15%; 30%), в качестве контроля использовали диету, состоящую из пшеничных отрубей без добавления рыбной муки. Кроме того, для сравнения личинок выращивали и на стандартном рационе – курином корме (КК). Субстрат из пшеничных отрубей без добавления рыбной муки использовали как контрольный рацион (КР). Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальный прирост энтомологической биомассы наблюдался у личинок на рационе из куриного корма. Наибольшее содержание белка в личинках зафиксировано при выращивании насекомых на высокобелковых рационах с добавлением рыбной муки в количестве 15 и 30% и составило $53,31 \pm 0,67$ и $54,33 \pm 1,02\%$ соответственно по сухому веществу. Наибольшее содержание жира выявлено на контрольном рационе без белковой добавки – $41,57 \pm 1,75\%$. Скорость развития личинок на смоделированных рационах оценивалась в последний день эксперимента по количеству предкуколок. Наибольшее количество предкуколок наблюдалось на РМ 15% и РМ 30% и составило $13,38 \pm 3,42$ и $11,52 \pm 3,87\%$ соответственно. Самый высокий коэффициент конверсии корма BER (Bioconversion Efficiency Rate) составил $33,29 \pm 3,54\%$ на курином корме. Наиболее значимыми нутриентами, количество которых надо учитывать при моделировании рационов, являются белки и углеводы.

INFLUENCE OF PROTEIN SUPPLEMENT IN THE DIETS OF LARVAE *HERMETIA ILLUCENS* ON PROTEIN ACCUMULATION AND BIOMASS GROWTH

¹ K.G. Kuznetsova, Junior researcher

¹ E.V. Mechtaeva, Junior researcher

¹ A.A. Meshcheryakov, PhD in Chemical Sciences, Junior Researcher

¹ A.Z. Zhuravleva, PhD in Veterinary Sciences, Deputy Director

² A.D. Chernov, Deputy Head

¹G.P. Kotova, Research Assistant

¹V.Yu. Sitnov, Director

¹D.S. Ryabukhin, PhD in Chemical Sciences, Head of Laboratory

¹RSRI of Food Additives – the Federal Scientific Center for Food Systems branch named after V.M. Gorbатов” RAS, St. Petersburg, Russia

²North-Western Testing Laboratory, Federal State Budgetary Institution “Federal Center for Animal Health”, St. Petersburg, Russia

E-mail: k.kuznetsova@fncps.ru

Keywords: Black Soldier Fly larvae, *Hermetia illucens*, bioconversion, feed ration, protein accumulation.

Abstract. *With the enormous increase in food and agricultural residues, there is a need to find new ways to dispose of the waste. One of the promising technologies is the bioconversion of organic waste by *Hermetia illucens* larvae or Black Soldier fly (BSF) larvae. BSF larvae can transform low-value raw materials into protein- and fat-rich entomological biomass, which can be used as raw material to produce feed for livestock, poultry, and aquaculture. To improve this technology and increase bioconversion efficiency, research into the selection of optimal feed rations for BSF larvae is necessary. This study aims to analyze the effect of high-protein experimental diets fortified with fish meal (FM) on protein and fat accumulation in larvae, entomological biomass growth, and larvae's growth rate in achieving the pre-pupal stage. As part of the experiment, dieting wheat bran with different fish meal contents (5%, 15%, 30%) was modelled, and a diet consisting of wheat bran was used as the control diet (CD). Larvae were also reared on a standard diet, chicken feed (CF), for comparison. The results indicate that larvae reared on CF observed the maximum entomological biomass growth rate. The highest protein content in larvae was found when insects were raised on high-protein diets with fish meal at 15% and 30% and was $53.31 \pm 0.67\%$ and $54.33 \pm 1.02\%$ in dry matter, respectively. The highest fat content was found on the control diet fed without protein supplement – CD ($41.57 \pm 1.75\%$). The larval development rate on the modelled diets was assessed on the last day of the experiment by the number of pre-pupae. The highest number of pre-pupae was obtained on FM 15% and FM 30% and was $13.38 \pm 3.42\%$ and $11.52 \pm 3.87\%$, respectively. The highest feed conversion BER (Bioconversion Efficiency Rate) was $33.29 \pm 3.54\%$ at CF. Proteins and carbohydrates are the most significant nutrients when modelling feed rations.*

Численность населения мира растет экспоненциально и к 2050 г. может превысить 9,8 млрд человек [1]. Устойчивое достижение продовольственной безопасности представляет собой важную задачу с точки зрения поиска новых продовольственных и сельскохозяйственных ресурсов и сокращения количества органических отходов [2, 3].

В связи с важностью проблемы образования пищевых отходов Организация Объединенных Наций в 2015 г. представила глобальную повестку для достижения устойчивого управления пищевыми отходами через Цели устойчивого развития, из которых Цель 12 гласит, что количество пищевых отходов на душу населения должно быть сокращено вдвое к 2030 г. [4]. Для достижения этой цели необходимо использовать новые способы утилизации отходов.

Черная львинка (*Hermetia illucens*) относится к семейству львинок (Stratiomyidae), в дикой природе встречается в тропических и субтропических регионах. Преимуществами выращивания черной львинки являются ко-

роткий жизненный цикл, который длится от 36 до 52 дней [5, 6], и способность успешно утилизировать широкий спектр вторичных сырьевых ресурсов [7, 8], к которым относятся: фрукты [9], отходы скотобоен [5, 10], навоз [11], куриный помет [12]. Энтомологическая биомасса личинок черной львинки содержит высокий уровень белка и жира по сравнению с другими видами съедобных насекомых [13, 14]. Побочным продуктом биоконверсии отходов является и биогузмус, являющийся органическим удобрением пролонгированного действия [15]. Поэтому черная львинка – перспективный инструмент для создания инфраструктуры по утилизации пищевых отходов в любом регионе мира [10].

Разработка инновационных, экономически эффективных и экологически чистых технологий, таких как разведение съедобных насекомых на органических отходах в качестве альтернативных источников белка, приобретает важное значение, поскольку они являются перспективной и устойчивой альтернативой животным и

растительным источникам белка для кормовых целей [16 – 19].

Одним из предполагаемых преимуществ насекомых перед традиционными сельскохозяйственными животными является их более высокая эффективность в конверсии корма. Однако она зависит от нескольких факторов: во-первых, от потребляемого рациона, во-вторых, от вида насекомого: из-за различий в пищеварительных системах и потребностях в питательных веществах один и тот же рацион может приводить к разной эффективности конверсии корма у разных видов насекомых [20].

Подбор оптимального рациона, подходящего по нутриентному составу, является перспективным направлением исследований, потому что позволит повысить эффективность биоконверсии органических отходов и достичь большего содержания белка и жира в энтомологической биомассе [21]. Р. Gobbi и соавт. рассматривали влияние смоделированных рационов питания, состоящих из куриного корма, мясокостной муки и их смеси, на личинок мухи черной львинки [22]. Однако в этом исследовании авторы ставили перед собой цель проанализировать влияние рационов питания на развитие имаго и плодовитость самок.

Аналогичные исследования проводились в отношении личинок кукурузного стеблевого мотылька (*Helicoverpa zea*). С.А. Deans и соавт. [23] описали влияние рациона с высоким содержанием белка и углеводов на скорость роста и нутриентный состав насекомого. Это исследование имеет прикладную значимость в области разработки оптимальных рационов питания для насекомых, однако стеблевой мотылек не выращивается в промышленных масштабах для утилизации отходов и получения альтернативных кормовых продуктов.

Л.А. Sammask и соавт. [24] также рассматривали влияние белков и углеводов в рационе кормления на жизненный цикл и яйценоскость мухи черной львинки.

Целью данного исследования являлось изучение влияния высокобелковых экспериментальных рационов кормления на личинок черной львинки. В задачи работы входило определение влияния состава рациона питания на скорость развития личинок мухи черная львинка, анализ накопления белка и прироста

биомассы, оценка эффективности конверсии корма при разных рационах кормления. Данное исследование вносит вклад в повышение экономической эффективности выращивания энтомологической биомассы личинок данного вида насекомого.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперимент проводился на базе лаборатории промышленных биотехнологических инноваций Всероссийского научно-исследовательского института пищевых добавок. Яйца личинок изначально помещали в исследуемые рационы в контейнеры 5 x 6 x 10 см, в них проходила инкубация яиц при температуре 27 ± 2 °C и относительной влажности 70% в лабораторном термостате ТС-80 (Россия). Для каждого рациона проводилось три параллельных эксперимента. После вылупления личинок все контейнеры переместили из инкубатора в специальную климатическую комнату площадью 2,25 м² и выдерживали при температуре 25 ± 2 °C и относительной влажности $55 \pm 5\%$; фотопериод составил 12 : 12 ч (день : ночь). На восьмой день эксперимента личинок переселили в более крупные контейнеры 15 x 20 x 30 см.

Для данного эксперимента были подготовлены рационы, состоящие из отрубей пшеничных (ГОСТ 7169–2017 Отруби пшеничные. Технические условия) с разным содержанием белковой добавки – рыбной муки (РМ, ГОСТ 2116–2000 Мука кормовая из рыбы, морских млекопитающих, ракообразных и беспозвоночных. Технические условия): РМ 5% – отруби пшеничные с замещением 5% массы рыбной мукой; РМ 15% – рацион с замещением 15% массы отрубей рыбной мукой; РМ 30% – замещение 30% массы отрубей рыбной мукой. В качестве контрольного рациона (КР) использовали пшеничные отруби, кроме того, в данном исследовании применяли куриный корм (КК, ГОСТ 18221–2018 Комбикорма полнорационные для сельскохозяйственной птицы) в качестве рациона сравнения.

В сумме каждый экспериментальный рацион состоял из 580 г корма по сухой массе и 1160 г воды.

В табл. 1 представлен состав рационов с низкой, средней и высокой концентрацией белковой добавки. Содержание макронутриентов

рассчитано на основании данных, полученных от компаний-производителей.

Таблица 1

Состав экспериментальных рационов, %
Composition of experimental diets, %

Показатели	КР	КК	РМ 5%	РМ 15%	РМ 30%
Белки	16	14	19	24	32
Жиры	4	3	4	5	6
Углеводы	17	15	16	14	12

Измерение массы личинок чёрной львинки проводили для каждой повторности 4 раза в течение всего периода эксперимента: на 5, 8, 10 и 15-й дни жизни личинок. Для этого из каждого из 16 контейнеров отбирали аликвоту 25–35 личинок, которых отделяли от субстрата, промывали на сите, удаляли излишки воды фильтровальной бумагой и взвешивали на лабораторных весах AND GX-800 (Япония) с точностью до 0,001 г. После взвешивания личинок возвращали в тот же контейнер, откуда доставали.

В конце эксперимента всех личинок вынимали из субстрата с помощью просеивания через сито с размером ячеек 3 мм, далее биомассу промывали, подсушивали с помощью фильтровальной бумаги и взвешивали.

Предкуколки черной львинки были отделены от личиночной биомассы, взвешены и подсчитаны. Кроме этого, конечную массу биогумуса измеряли взвешиванием на лабораторных весах ADAM HCB-2202 (Великобритания) с точностью 0,01 г.

Образцы личинок, предкуколок и зоогумуса были собраны, расфасованы и заморожены при –18 °С для проведения дальнейших анализов.

Для измерения прироста биомассы в последний день использовали только тех особей, которые еще не начали окукливание и переход на стадию предкуколки, это позволило определить истинную массу личинок, так как во время окукливания черная львинка теряет массу, помимо этого, на стадии окукливания меняется и ее нутриентный состав [25].

Состав личинок черной львинки, выращенных на исследуемых субстратах, определяли с использованием следующих методик: сырой

жир – по ГОСТ 13496.15–2016 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения массовой доли сырого жира; содержание сырого протеина – по ГОСТ 13496.4–2019 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье, для перерасчета общего белка был применен коэффициент 6,25; влагу в анализируемых образцах – по ГОСТ Р 54951–2012 Корма для животных. Определение содержания влаги.

Эффективность биоконверсии каждой экспериментальной диеты рассчитана с поправкой на остаточный биогумус (BER – Bioconversion Efficiency Rate) по формуле [26]

$$BER = \frac{L_{\text{конеч}} - L_{\text{нач}}}{D_{\text{нач}} - R_{\text{конеч}}} \times 100$$

где $D_{\text{нач}}$ – начальное количество субстрата, г; $R_{\text{конеч}}$ – конечное количество субстрата (биогумуса), г; $L_{\text{конеч}}$ – конечная масса личинок, г; $L_{\text{нач}}$ – начальная масса личинок, г.

Для прироста биомассы рассчитано среднее арифметическое результатов трёх параллельных экспериментов и стандартное отклонение; для показателей общего жира, белка и содержания влаги стандартная ошибка среднего. Однофакторный дисперсионный анализ ($P \leq 0,05$) проводили для определения статистически значимых различий полученных показателей белка, жира, а также прироста биомассы на разных рационах кормления. Для обнаружения зависимости между макронутриентами в экспериментальных диетах и макронутриентами в личинках проводили корреляционный анализ. Все расчеты проведены с применением программного компонента Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение массы личинок проводилось 4 раза за весь период проведения эксперимента. Первый раз их массу измеряли на 5-й день жизни, второе измерение массы осуществлялось на 8-й день жизни, далее измерение провели на 10-й день жизни, последним днем эксперимента был 15-й день жизни личинок. На рис. 1 представлена диаграмма изменения средней сырой массы личинки в перерасчете на одну особь на каждом из экспериментальных рационов питания, значения указаны со стандартным отклонением.

На 5-й день средняя масса особи на исследуемых рационах составила: КР = $5,08 \pm 0,80$ мг; КК = $3,79 \pm 1,66$; РМ 5% = $10,85 \pm 0,64$; РМ 15% = $12,73 \pm 1,95$; РМ 30% = $9,39 \pm 6,36$ мг ($n=3$; $F > F_{кр}$; $P=0,0024$); на 8-й день эксперимента

наблюдались незначительные изменения в приросте биомассы личинок: КР = $24,27 \pm 6,13$ мг; КК = $20,23 \pm 4,07$; РМ 5% = $31,94 \pm 11,43$; РМ 15% = $38,42 \pm 16,89$; РМ 30% = $40,91 \pm 15,03$ мг ($n=3$; $F < F_{кр}$; $P=0,2058$), статистически значимых различий не обнаружено. На 10-й день КР = $58,76 \pm 11,43$ мг; КК = $41,03 \pm 7,13$; РМ 5% = $81,75 \pm 22,64$; РМ 15% = $88,89 \pm 12,66$; РМ 30% = $109,34 \pm 14,40$ мг ($n=3$; $F > F_{кр}$; $P=0,0016$). В последний день эксперимента проведено заключительное взвешивание, средняя биомасса одной особи составила: КР = $132,58 \pm 19,12$ мг; КК = $136,76 \pm 6,36$; РМ 5% = $110,96 \pm 19,70$; РМ 15% = $104,11 \pm 24,00$; РМ 30% = $124,52$ мг ($n=3$; $F < F_{кр}$; $P=0,2035$). При анализе прироста биомассы личинок на рационах питания с повышенным содержанием белка статистически значимых различий в конце эксперимента не обнаружено.

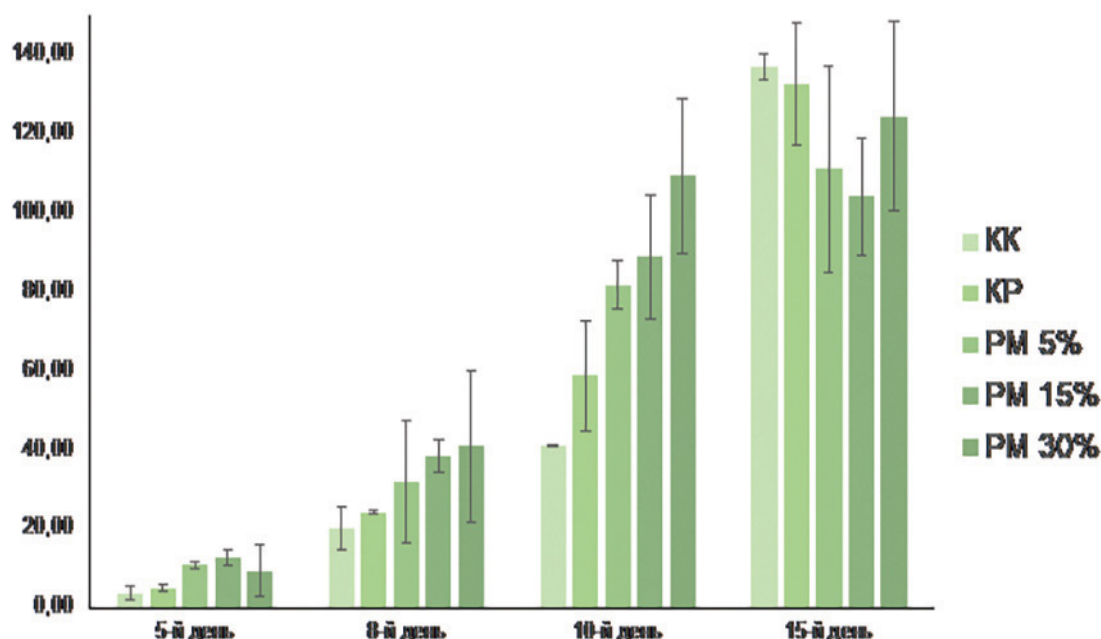


Рис. 1. Изменение средней массы особи на исследуемых рационах питания (значение $\pm$ стандартное отклонение)

Change in the average weight of an individual on the studied diets (value $\pm$ standard deviation)

При увеличении содержания белка в рационах черной львинки наблюдалось уменьшение влажности личинок ($n=3$; $F > F_{кр}$; $P=0,0005$) (табл. 2). Коэффициент корреляции ($r=-0,65$) указывает на наличие отрицательной линейной зависимости содержания влаги в личинке от количества белка в рационе. Таким образом, мы можем говорить об увеличении плотности

личинок на рационах с высоким содержанием белка.

Личинки, которые росли на диете с повышенным содержанием жира и белка (РМ 5%; РМ 15%; РМ 30%) имели невысокую концентрацию жира ($n=3$; $F > F_{кр}$; $P=0,0005$). Зависимости между содержанием жира в рационах питания и жиром в личинках не обнаружено ($r=-0,25$).

Таблица 2

Среднее содержание белка, и жира (на сухое вещество) и влаги в личинках и стандартная ошибка среднего при $n=3$, %

Average protein, fat (dry matter) and moisture content in larvae and standard error of the mean at $n=3$, %

Рацион	Общий жир, %		Белок, %		Влага, %	
	значение	SE	значение	SE	значение	SE
КР	41,57	1,75	48,97	4,08	70,28	0,86
КК	26,52	0,53	41,37	1,57	72,39	0,80
РМ 5%	28,02	0,21	51,65	0,65	69,79	1,25
РМ 15%	26,52	2,51	53,31	0,67	69,92	0,39
РМ 30%	25,97	1,25	54,33	1,02	66,93	2,23

Самая высокая концентрация жира наблюдалась в рационе РМ 30%, а самая низкая – в КР, однако наибольшее содержание сырого жира выявлено у личинок, которые росли на контрольной диете (КР), что может быть связано с повышенным содержанием углеводов в этом рационе (согласно табл. 1). Корреляционный анализ показал наличие прямой зависимости, подтверждающей, что возрастание содержания углеводов в корме приводит к увеличению содержания жира в личинках ($r=0,73$). К похожему выводу пришли S.V. Leong с соавт. [29], которые констатировали, что на содержание жира в личинках черной львинки не влияет концентрация жира в рационе.

В исследовании метаболической адаптации жирового тела личинок черной львинки к рационам кормления обнаружено, что диета с более низким содержанием белка и жира приводила к уменьшению белковых гранул в теле черной львинки и, наоборот, к увеличению жировых гранул [30], что частично соответствует полученным нами результатам, так как на контрольном рационе с пониженным содержанием жира и белка КР отмечено самое большое количество жира в личинке.

Полученные данные соотносятся с утверждением, что питательный состав рационов может оказывать влияние на нутриентный состав личинок мухи черной львинки [27, 28]. Однако влияния белка в рационе на прирост энтомологической биомассы не обнаружено.

Концентрация сырого белка в личинках варьировала от 40 до 55% по сухому веществу

(см. табл. 2). Наибольшее содержание сырого протеина наблюдалось в личинках, которые росли на субстрате РМ 30%, однако оно незначительно превышает содержание белка на РМ 15%. В настоящем исследовании показано, что количественное содержание сырого белка в личинках мухи черная львинка зависит от количества белка в рационе ($n=3$; $F > F_{кр}$; $P=0,0047$), об этом также свидетельствует прямая умеренная корреляция ($r=0,758$). Полученные результаты соответствуют выводам D. Beesigamukama [15]. T. Spranghers [31] обнаружили аналогичное содержание белка в диапазоне от 40 до 43% по сухому веществу у личинок, питавшихся кормами с содержанием белка в диапазоне от 9 до 25% по сухому веществу.

К таким же выводам пришли T.T. Nguyen и соавт. [32]. В их работе показано, что личинки, питавшиеся высокобелковыми диетами животного происхождения, имеют гораздо более высокое содержание белка, чем личинки, питавшиеся растительными отходами.

M. Tschirner и A. Simon [33] представили противоположный результат: в их исследовании содержание сырого протеина было выше (52,3% по сухому веществу) у личинок, которых кормили рационом с наименьшим содержанием сырого протеина (8,5% сухому веществу).

Скорость развития личинок оценивали по количеству особей, перешедших на стадию предкуколки, в последний день эксперимента (табл. 3).

Таблица 3

Количество предкуколок на каждом рационе питания в последний день эксперимента и стандартная ошибка среднего при $n=3$

Number of prepupae on each diet on the last day of the experiment and standard error of the mean at $n=3$

Рацион питания	Количество предкуколок, %	
	значение	SE
КР	4,50	0,35
КК	0,26	0,12
РМ 5%	9,68	2,83
РМ 15%	13,38	3,42
РМ 30%	11,52	3,87

К концу эксперимента наибольшее количество предкуколок наблюдалось на рационах РМ 15% ($13,38 \pm 3,42\%$) и РМ 30% ($11,52 \pm 3,87\%$), проведенный однофакторный дисперсионный анализ подтвердил, что различия в процентном количестве предкуколок на каждом рационе питания являются статистически значимыми ($n=3$, $P=0,0306$). Это может свидетельствовать о более коротком времени развития и быстром переходе на следующую стадию жизненного цикла.

К похожим результатам о влиянии рациона кормления на количество предкуколок пришли D.G. Oonincx и соавт. [34]. У личинок черной

львинки, при кормлении побочными продуктами с высоким содержанием белка время развития было короче (21 день), чем у личинок, выращиваемых на низкобелковой диете (37 дней). В исследованиях A. Scala и др. [28], а также P. Simon и соавт. [35] отмечена схожая зависимость: увеличение времени развития личинок и более длительный прирост биомассы на субстратах с низким содержанием белка.

Средняя масса и влажность биогумуса, а также эффективность биоконверсии корма с поправкой на биогумус (BER), полученный в процессе биоконверсии экспериментальных рационов питания, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели биоконверсии экспериментальных рационов кормления
Bioconversion indicators of experimental feeding rations

Рацион питания	Средняя масса биогумуса, г		Влага в биогумусе, %		BER, %	
	Значение	SE	Значение	SE	Значение	SE
КР	345,06	18,59	63,32	1,03	18,20	1,99
КК	404,60	51,63	57,21	4,27	33,29	3,54
РМ 5%	381,14	14,29	56,72	3,05	23,68	2,76
РМ 15%	426,20	30,07	56,01	3,87	26,54	2,33
РМ 30%	313,36	25,04	30,00	2,99	26,15	2,83

Наиболее высокая эффективность биоконверсии выявлена у личинок, которые росли на диете КК, наименее эффективным оказался контрольный рацион. Сравнительно высокие показатели биоконверсии отмечены на высокобелковых рационах питания РМ 15% и РМ 30%.

ВЫВОДЫ

1. Самый высокий прирост биомассы к последнему дню эксперимента наблюдался на рационе питания КК ($136,76 \pm 6,36$ мг) с низким

содержанием белка в субстрате (14%), что может быть связано с более быстрым переходом личинок, которые росли на рационах с добавлением рыбной муки, на стадию предкуколки.

2. Исходя из количества особей, которые начали окукливание, можно сделать вывод о влиянии рациона на скорость развития личинок. Чем больше личинок начали переход на следующую стадию жизненного цикла к последнему дню эксперимента, тем быстрее они развивались на данном рационе. В этом исследовании

довании наибольшее количество предкуколок выявлено на РМ 15% ($13,38 \pm 3,42\%$) и РМ 30% ($11,52 \pm 3,87\%$).

3. Содержание жира в рационах личинок не влияло на содержание жира в самих личинках, но, возможно, оно влияет на жирно-кислотный состав черной львинки. Самое высокое содержание жира ($41,57 \pm 1,75\%$) наблюдалось у личинок на контрольном рационе с самой высокой концентрацией углеводов.

4. При увеличении концентрации белка в рационе наблюдалось увеличение содержания белка в личинках, самое высокое содержание составило $54,33 \pm 1,02\%$ на рационе питания с 32% белка (РМ 30%).

5. Наиболее эффективным рационом с точки зрения показателя биоконверсии BER является рацион КК, а самые низкие значения BER у РМ 15% – 26,54% и РМ 30% – 26,15%.

6. Выводы, полученные в ходе настоящего исследования, позволят подобрать оптимальный рацион питания для повышения экономической эффективности технологии биоконверсии и оптимизировать процесс получения энтомологической биомассы с высоким содержанием белка и жира для использования в кормовом производстве.

Коллектив авторов благодарит Сутулу Глеба Игоревича и Мелякова Михаила Алексеевича за участие в подготовке и проведении эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *World Population Prospects: The 2017 Revision*, UN DESA. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html> (дата обращения: 10.06.2023).
2. *Livestock and the environment: what have we learned in the past decade?* / M. Herrero, S. Wiersma, B. Henderson [et al.] // *Annual Review of Environment and Resources*. – 2015. – Vol. 40. – P. 177–202. – <https://doi.org/10.1146/annurev-enviro-031113-093503>.
3. Tallentire C.W., Mackenzie S.G., Kyriazakis I. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 187. – P. 338–347. – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.212>.
4. *Цели в области устойчивого развития* [Электронный ресурс]. – 2016. – URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 15.06.2023).
5. *Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (Hermetia illucens)* / C. Lalander, S. Diener, C. Zurbrugg [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 208. – P. 211–219. – <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>.
6. Marshall S.A., Woodley N.E., Hauser M. The historical spread of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera, Stratiomyidae, Hermetiinae), and its establishment in Canada // *The Journal of the Entomological Society of Ontario*. – 2015. – Vol. 146. – P. 51–54.
7. Mutafela R.N. High value organic waste treatment via black soldier fly bioconversion: onsite pilot study // Master of Science Thesis. – Stockholm, 2015. – 73 p.
8. *Growth of the black soldier fly Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on organic-waste residues and its application as supplementary diet for Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae) / R. Pérez-Pacheco, D. Hinojosa-Garro, F. Ruiz-Ortiz [et al.] // *Insects*. – 2022. – Vol. 13 (4). – P. 326. – <https://doi.org/10.3390/insects13040326>.
9. *Black soldier fly larvae (BSFL) and their affinity for organic waste processing* / S.A. Siddiqui, B. Ristow, T. Rahayu [et al.] // *Waste Management*. – 2022. – Vol. 140. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.044>.
10. *Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae* / S. Diener, N.M. Studt Solano, F. Roa Gutiérrez [et al.] // *Waste and Biomass Valorization*. – 2011. – Vol. 2. – P. 357–363. – <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9079-1>.
11. *Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure* / H.M. Myers, J.K. Tomberlin, B.D. Lambert [et al.] // *Environmental entomology*. – 2014. – Vol. 37 (1). – P. 11–15. – <https://doi.org/10.1093/ee/37.1.11>.
12. Fatchurochim S., Geden C.J., Axtell R.C. Filth fly (Diptera) oviposition and larval development in poultry manure of various moisture levels // *Journal of Entomological Science*. – 1989. – Vol. 24 (2). – P. 224–231. – <https://doi.org/10.18474/0749-8004-24.2.224>.

13. *Biodiesel* production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes / L. Zheng, Y. Hou, W. Li [et al.] // *Energy*. – 2012. – Vol. 47 (1). – P. 225–229. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.006>.
14. *Barragan-Fonseca K.B., Dicke M., van Loon J.J.* Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed—a review // *Journal of Insects as Food and Feed*. – 2017. – Vol. 3 (2). – P. 105–120. – <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>.
15. *Low-cost* technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly / D. Beesigamukama, B. Mochoge, N.K. Korir [et al.] // *Waste Management*. – 2021. – Vol. 119. – P. 183–194. – <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.043>.
16. *State-of-the-art* on use of insects as animal feed / H.P. Makkar, G. Tran, V. Heuzé [et al.] // *Animal feed science and technology*. – 2014. – Vol. 197. – P. 1–33. – <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.00>.
17. *A value-added* manure management system using the black soldier fly / D.C. Sheppard, G.L. Newton, S.A. Thompson [et al.] // *Bioresource technology*. – 1994. – Vol. 50 (3). – P. 275–279. – [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90102-3).
18. *Partial* or total replacement of soybean oil by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) fat in broiler diets: Effect on growth performances, feed-choice, blood traits, carcass characteristics and meat quality / A. Schiavone, M. Cullere, M. De Marco [et al.] // *Italian Journal of Animal Science*. – 2017. – Vol. 16 (1). – P. 93–100. – <https://doi.org/10.1080/1828051X.2016.1249968>.
19. Производство биотехнологического продукта на питательной среде из растительного сырья / В.Б. Цугкиева, Л.Б. Дзантиева, Л.Х. Тохтиева [и др.] // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. – 2022. – № (3). – С. 76–82. – <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-64-3-76-82>.
20. *Cohen A.C.* Insect diets: science and technology // CRC press. – 2015. – 344 p. – <https://doi.org/10.1201/b18562>.
21. *Oonincx D.G.* Insects as Food for Insectivores. Mass Production of Beneficial Organisms: Invertebrates and Entomopathogens. – London, UK: Academic Press. – 2014. – 616 p. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391453-8.00017-0>.
22. *Gobbi P., Martinez-Sanchez A., Rojo S.* The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) // *European Journal of Entomology*. – 2013. – Vol. 110 (3). – P. 461. – <https://doi.org/10.14411/eje.2013.061>.
23. *Deans C.A., Sword G.A., Behmer S.T.* Revisiting macronutrient regulation in the polyphagous herbivore *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae): New insights via nutritional geometry // *Journal of insect physiology*. – 2015. – Vol. 81. – P. 21–27. – <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2015.06.015>.
24. *Cammack J.A., Tomberlin J.K.* The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) // *Insects*. – 2017. – Vol. 8 (2). – P. 1–14. – <https://doi.org/10.3390/insects8020056>.
25. *Diener S., Zurbrugg C., Tockner K.* Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates // *Waste Management & Research*. – 2009. – Vol. 27 (6). – P. 603–610. – <https://doi.org/10.1177/0734242X0910383>.
26. *Standardisation* of quantitative resource conversion studies with black soldier fly larvae / G. Bosch, D.G. Oonincx, H.R. Jordan [et al.] // *Journal of Insects as Food and Feed*. – 2020. – Vol. 6 (2). – P. 95–109. – <https://doi.org/10.3920/JIFF2019.0004>.
27. *Effect* of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae / M. Meneguz, A. Schiavone, F. Gai [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2018. – Vol. 98 (15). – P. 5776–5784. – <https://doi.org/10.1002/jsfa.9127>.
28. *Rearing* substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale / A. Scala, J.A. Cammack, R. Salvia [et al.] // *Scientific reports*. – 2020. – Vol. 10 (1). – P. 1–8. – <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8>.
29. *Comparative* study on the effect of organic waste on lauric acid produced by *Hermetia illucens* larvae via bioconversion / S.Y. Leong, S.R.M. Kutty, C.K. Tan [et al.] // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2015. – Vol. 8. – P. 52–63.

30. *Metabolic* adjustment of the larval fat body in *Hermetia illucens* to dietary conditions / A.C. Pimentel, A. Montali, D. Bruno [et al.] // *Journal of Asia-Pacific Entomology*. – 2017. – Vol. 20 (4). – P. 1307–1313. – <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2017.09.017>.
31. *Nutritional* composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates / T. Spranghers, M. Ottoboni, C. Klootwijk [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2017. – Vol. 97 (8). – P. 2594–2600. – <https://doi.org/10.1002/jsfa.8081>.
32. *Nguyen T.T., Tomberlin J.K., Vanlaerhoven S.* Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste // *Environmental entomology*. – 2015. – Vol. 44 (2). – P. 406–410. – <https://doi.org/10.1093/ee/nvv002>.
33. *Tschirner M., Simon A.* Influence of different growing substrates and processing on the nutrient composition of black soldier fly larvae destined for animal feed // *Journal of insects as food and feed*. – 2015. – Vol. 1 (4). – P. 249–259. – <https://doi.org/10.3920/JIFF2014.0008>.
34. *Feed* conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products / D.G. Oonincx, S. Van Broekhoven, A. Van Huis [et al.] // *PLOS One*. – 2015. – Vol. 10 (12). – e0144601. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144601>.
35. *Simon P.P., Krüger R.F., Ribeiro P.B.* Influence of diets on the rearing of predatory flies of housefly larvae // *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*. – 2011. – Vol. 63. – P. 1414–1420. – <https://doi.org/10.1590/S0102-09352011000600019>.

REFERENCES

1. *World Population Prospects: The 2017 Revision*, UN DESA. Available at: <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>.
2. Herrero M., Wiersenius S., Henderson B. et al., Livestock and the environment: what have we learned in the past decade? *Annual Review of Environment and Resources*, 2015, Vol. 40, pp. 177–202, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-031113-093503>.
3. Tallentire C.W., Mackenzie S.G., Kyriazakis I., Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 187, pp. 338–347, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.212>.
4. *Tseli v oblasti ustoichivogo razvitiya*, 2016: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>.
5. Lalander C., Diener S., Zurbrugg C. et al., Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*), *Journal of Cleaner Production*, 2019, Vol. 208, pp. 211–219, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>.
6. Marshall S.A., Woodley N.E., Hauser M., The historical spread of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera, Stratiomyidae, Hermetiinae), and its establishment in Canada, *The Journal of the Entomological Society of Ontario*, 2015, Vol. 146, pp. 51–54.
7. Mutafela R.N. High value organic waste treatment via black soldier fly bioconversion: onsite pilot study, *Master of Science Thesis*, Stockholm, 2015, 73 p.
8. Siddiqui S.A., Ristow B., Rahayu T. et al., Black soldier fly larvae (BSFL) and their affinity for organic waste processing, *Waste Management*, 2022, Vol. 140, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.044>.
9. Pérez-Pacheco R., Hinojosa-Garro D., Ruíz-Ortíz F. et al., Growth of the black soldier fly *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on organic-waste residues and its application as supplementary diet for Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae), *Insects*, 2022, Vol. 13 (4), pp. 326. <https://doi.org/10.3390/insects13040326>.
10. Diener S., Studt Solano N.M., Roa Gutiérrez F. et al., Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae, *Waste and Biomass Valorization*, 2011, Vol. 2, pp. 357–363, <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9079-1>.
11. Myers H.M., Tomberlin J.K., Lambert B.D. et al., Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure, *Environmental entomology*, 2014, Vol. 37 (1), pp. 11–15, <https://doi.org/10.1093/ee/37.1.11>.
12. Fatchurochim S., Geden C.J., Axtell R.C., Filth fly (Diptera) oviposition and larval development in poultry manure of various moisture levels, *Journal of Entomological Science*, 1989, Vol. 24 (2), pp. 224–231, <https://doi.org/10.18474/0749-8004-24.2.224>.

13. Zheng L., Hou Y., Li W. et al., Biodiesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes, *Energy*, 2012, Vol. 47 (1), pp. 225–229, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.006>.
14. Barragan-Fonseca K.B., Dicke M., van Loon J.J., Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed—a review, *Journal of Insects as Food and Feed*, 2017, Vol. 3(2), pp. 105–120, <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>.
15. Beesigamukama D., Mochoge B., Korir N.K. et al., Low-cost technology for recycling agro-industrial waste into nutrient-rich organic fertilizer using black soldier fly, *Waste Management*, 2021, Vol. 119, pp. 183–194, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.043>.
16. Makkar H.P., Tran G., Heuzé V. et al., State-of-the-art on use of insects as animal feed, *Animal feed science and technology*, 2014, Vol. 197, pp. 1–33, <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.00>.
17. Sheppard D.C., Newton G.L., Thompson S.A. et al., A value-added manure management system using the black soldier fly, *Bioresource technology*, 1994, Vol. 50 (3), pp. 275–279, [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90102-3).
18. Schiavone A., Cullere M., De Marco M. et al., Partial or total replacement of soybean oil by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) fat in broiler diets: Effect on growth performances, feed-choice, blood traits, carcass characteristics and meat quality, *Italian Journal of Animal Science*, 2017, Vol. 16 (1), pp. 93–100, <https://doi.org/10.1080/1828051X.2016.1249968>.
19. Tsugkueva V.B., Dzantieva L.B., Tokhtieva L.Kh., Doev D.N., Shabanova I.A., Datieva B.A., *Vestnik NGAU (Novosibirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet)*, 2022, No. 3 (64), pp. 76–82, <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-64-3-76-82>. (In Russ.)
20. Cohen A.C., *Insect diets: science and technology*, CRC press, 2015, <https://doi.org/10.1201/b18562>.
21. Oonincx D.G.A.B., *Insects as Food for Insectivores. Mass Production of Beneficial Organisms: Invertebrates and Entomopathogens*, London, UK: Academic Press, 2013, 616 p.
22. Gobbi P., Martinez-Sanchez A., Rojo S., The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), *European Journal of Entomology*, 2013, Vol. 110 (3), pp. 461, <https://doi.org/10.14411/eje.2013.061>.
23. Deans C.A., Sword G.A., Behmer S.T., Revisiting macronutrient regulation in the polyphagous herbivore *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae): New insights via nutritional geometry, *Journal of insect physiology*, 2015, Vol. 81, pp. 21–27.
24. Cammack J.A., Tomberlin J.K., The impact of diet protein and carbohydrate on select life-history traits of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), *Insects*, 2017, Vol. 8 (2), pp. 56, <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2015.06.015>.
25. Diener, S., Zurbrugg, C., & Tockner, K., Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates, *Waste Management & Research*, 2009, Vol. 27 (6), pp. 603–610.
26. Bosch G., Oonincx D.G.A.B., Jordan, H.R. et al., Standardisation of quantitative resource conversion studies with black soldier fly larvae, *Journal of Insects as Food and Feed*, 2020, Vol. 6 (2), pp. 95–109, <https://doi.org/10.3920/JIFF2019.0004>.
27. Meneguz M., Schiavone A., Gai F., et al., Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, Vol. 98 (15), pp. 5776–5784, <https://doi.org/10.1002/jsfa.9127>.
28. Scala A., Cammack J.A., Salvia R. et al., Rearing substrate impacts growth and macronutrient composition of *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) larvae produced at an industrial scale, *Scientific reports*, 2020, 10 (1), pp. 19448, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76571-8>.
29. Leong S.Y., Kuty S.R.M., Tan C.K. et al., Comparative study on the effect of organic waste on lauric acid produced by *Hermetia illucens* larvae via bioconversion, *Journal of Engineering Science and Technology*, 2015, Vol. 8 (2015), pp. 52–63.
30. Pimentel A.C., Montali A., Bruno D. [et al.], Metabolic adjustment of the larval fat body in *Hermetia illucens* to dietary conditions, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2017, Vol. 20 (4), pp. 1307–1313, <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2017.09.017>.
31. Sprangers T., Ottoboni M., Klootwijk C. et al., Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97 (8), pp. 2594–2600, <https://doi.org/10.1002/jsfa.8081>.

32. Nguyen T.T., Tomberli J.K., Vanlaerhoven S, Van Huis, A, et al., Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products, *PloS one*, 2015, Vol. 10(12), pp. e0144601, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144601>.
33. Simon P.P., Krüger R.F., Ribeiro P.B., Influence of diets on the rearing of predatory flies of housefly larvae. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 2011, Vol. 63, pp. 1414–1420, <https://doi.org/10.1590/S0102-09352011000600019>.
34. Oonincx D.G., Van Broekhoven S, Van Huis, A, et al., Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products, *PloS one*, 2015, Vol. 10(12), pp. e0144601, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144601>.
35. Simon P.P., Krüger R.F., Ribeiro P.B., Influence of diets on the rearing of predatory flies of housefly larvae. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 2011, Vol. 63, pp. 1414–1420, <https://doi.org/10.1590/S0102-09352011000600019>.