

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ, ОБЗОРЫ

УДК: 636.087.69

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2026.3.5-26

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫРАЩИВАНИЯ ЛИЧИНОК ЧЁРНОЙ ЛЬВИНКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРМОВЫХ СРЕДСТВ С ВЫСОКОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ ЦЕННОСТЬЮ: ОБЗОР

¹Некрасов Р.В., ²Бутенко А.И., ²Пишулин И.Н., ²Студенков А.Н.

¹ВНИИФБиП – филиал ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, Боровск Калужской обл.,

²ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, Подольск –Дубровицы Московской обл.

В условиях глобального дефицита традиционных белковых ресурсов (рыбной и соевой муки) и необходимости утилизации органических отходов, развитие инсектотехнологий приобретает стратегическое значение. Чёрная львинка (*Hermetia illucens*) рассматривается как наиболее эффективный биотехнологический объект для конверсии биомассы в высококачественный кормовой белок и жир. Расширение доказательной базы применимости продуктов переработки личинок в рационах продуктивных животных является приоритетной задачей современного животноводства Российской Федерации. Статья представляет собой комплексный обзор фундаментальных и прикладных аспектов выращивания *Hermetia illucens*. В первой части рассматриваются физиологические особенности насекомого: короткий жизненный цикл (около 41 дня), уникальная морфология пищеварительного тракта полифага и способность к активному подщелачиванию субстрата. Описаны механизмы работы ферментативных систем средней кишки и роль микробиома в адаптации личинок к различным органическим отходам — от пищевых остатков до навоза КРС. Во второй части проанализирована эффективность биоконверсии. Установлено, что химический состав конечной биомассы напрямую программируется составом субстрата: углеводистые диеты способствуют накоплению липидов (до 57% жира), а белковые — синтезу протеина (до 62% в обезжиренной муке). Особое внимание уделено минеральному профилю личинок, отличающихся исключительно высокой концентрацией кальция (до 8–9%) и способностью аккумулировать микроэлементы из среды. Рассмотрены технологические параметры промышленного производства: оптимальная влажность субстрата (60–75%), плотность посадки и влияние механического измельчения отходов на скорость метаболизма насекомых. Третья часть посвящена детальному анализу химического состава продукта. Аминокислотный профиль характеризуется высоким содержанием лизина, лейцина и валина. Липидная фракция уникальна преобладанием насыщенных среднецепочечных жирных кислот, в частности лауриновой кислоты (до 59%), обладающей выраженными антибактериальными свойствами. Таким образом, личинки чёрной львинки являются универсальным сырьем для создания экологически чистых высокобелковых и энергетических кормовых средств. Биомасса обладает стабильным аминокислотным профилем, а её липидный состав может быть целенаправленно модифицирован через диету насекомых. Продукты переработки *Hermetia illucens* способны эффективно заменять дорогостоящие компоненты комбикормов, снижая импортозависимость кормовой отрасли.

Ключевые слова: личинки, инсектотехнологии, питание, отходы, кормовые добавки, жирные кислоты, аминокислоты.

Проблемы биологии продуктивных животных, 2026, 3:5-26

Введение

Чёрная львинка или *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) (Diptera: stratiomyidae) — один из самых известных видов мух во всем мире из-за своей пищевой ценности. Муха *Hermetia illucens* относится к подсемейству *Hermetiinae* семейства *Stratiomyidae*. Род *Hermetia* (Latreille, 1804) включает 76 видов. Чёрная львинка считается космополитичным видом в тропических, субтропических и умеренных регионах (Rozkosný R., 1983; Lessard B.D. et al., 2019; Marshall S.A. et al., 2015) и, следовательно, является наиболее широко распространенным представителем семейства *Stratiomyidae* в мире. По мнению некоторых исследователей, (Lessard B.D. et al. 2019, Marshall S.A. et al. 2015, Woodley N.E. 2001) чёрная львинка произошла из Северной и Южной Америки, где в настоящее время встречается от Аргентины до Канады. По мнению (Marshall S.A. et al. 2015) версия о том, что вид происходит из Южной Америки с последующим заселением Северной пока не имеет подтверждения и остаётся гипотетической. За пределами Южной и Северной Америки первое документально подтвержденное появление датируется 1930-ми годами на Гавайях (Hardy D.E., 1960), а затем в течение 1930-х и 1950-х годов на других островах Тихого океана, в Восточной Австралии, Юго-Восточной Азии и Новой Зеландии (Rozkosný R. 1983, Lessard B.D. et al. 2019, Marshall S.A. et al. 2015, Woodley N.E. 2001). В Европе о появлении чёрной львинки впервые сообщили на Мальте в 1926 году (Marshall S.A. et al. 2015). В конце 1980-х - львинка появилась в умеренных европейских регионах (Lessard B.D. et al. 2019, Marshall S.A. et al. 2015, Woodley N.E. 2001, Leclercq M. 1758). В 2019 году *Hermetia illucens* была замечена на территории Российской Федерации (Gladun V.V., 2019).

Глобальное распространение технологий глубокой переработки насекомых, активно внедряемое в том числе в государствах БРИКС, для создания кормовых компонентов требует систематизации научных данных об эффективности этих ингредиентов. На сегодняшний день доказана техническая реализуемость массового культивирования энтомологического сырья с использованием органических отходов (Некрасов и др., 2019). Муха чёрная львинка (*Hermetia illucens*) занимает особое место в мировой практике инсектотехнологий (Matsakidou A. et al., 2024). Последние исследования позволяют рассматривать личинок как полноценную функциональную основу рационов для аквакультуры, птицеводства и свиноводства (Mauger et al., 2016) и других отраслей. Целью данной работы был поиск и анализ данных о современном состоянии вопроса использования личинок чёрной львинки для получения в промышленном производстве кормовых средств для животных и птицы, что служит расширением представления о развитии инсектотехнологий в нашей стране.

1. Особенности питания и потребности личинок чёрной львинки в питательных веществах

Для чёрной львинки характерен короткий жизненный цикл - около 41 дня, который может увеличиваться до 131 дня в зависимости от питательного и энергетического состава кормовых субстратов и температуры окружающей среды (Kaya C. et al., 2021). Принято считать, что этот вид питается в основном на личиночной стадии и накапливает достаточно большое количество жира, чтобы уменьшить или вовсе исключить необходимость в питании взрослой особи (Sheppard et al., 2002). Однако ряд исследований указывают на то, что взрослая особь способна усваивать не только воду, но и углеводы и протеин. Так, например, если имаго содержать без доступа к воде, то средняя продолжительность жизни составляет от 8,7 дней (самцы) до 9,5 дней (самки). Добавление питьевой воды повышает продолжительность жизни до 11 дней как у самок, так и у самцов. Кроме того, кормление взрослых особей молоком увеличило продолжительность жизни самок на 1–2 дня при максимальном среднем значении 14 дней (Cesar Bertinetti et al., 2018). Также Томберлин и др. (Tomberlin J.K. et al., 2009) упоминают среднюю продолжительность жизни 14 дней для самок и 17 дней для самцов при температуре 27°C, обеспеченных водой. Кроме того, Накамура и др. (Nakamura S. et al., 2016) сообщалось о 21 дне для взрослых,

обеспеченных водой с растворенным в ней сахаром в качестве диеты увеличил продолжительность жизни самцов до 73 дней и 47 дней для самок.

Несмотря на то, что у имаго ротовой аппарат представляет из себя губку и не способен жевать твердую пищу, для обработки сухих частиц пищи имаго могут использовать слюну для разжижения и последующего всасывания жидкой массы (Oliveira F.R. et al., 2016). Учитывая влияние рациона питания на взрослых особей *H. illucens* можно предположить, что взрослые особи в дикой природе питаются тем, что доступно, например, нектаром (James M.T., 1981; Beuk P.L.T., 1990) или пыльцой (Komosinska-Vassev K. et al., 2015).

Как сообщает Шишков и др. (Shishkov O. et al., 2019) уникальной особенностью личинок чёрной львинки является высокая скорость поедания, чему способствуют особые поведенческие механизмы. При питании группа личинок скоординированно движется, образуя вокруг корма фонтаны, в которые снизу заползают новые личинки и выталкиваются вверх, благодаря чему корм становится доступным для всех личинок в группе за короткое время. Такое поведение поддерживается структурой ротового аппарата, который некоторые авторы называют «туннелепроходческой машиной», позволяющей с помощью гипофаринкса отделять более мелкие органические частицы от более крупных и неорганических (Bruno D. et al., 2020).

Личинки чёрной львинки питаются самыми разнообразными органическими субстратами (Diener et al., 2009), благодаря своей прожорливости всеядны и питаются широким спектром отходов животного и растительного происхождения (Кауа С. et al., 2021). По оценкам Шишкова и др. (Shishkov O. et al. 2019) в зависимости от влажности субстрата, могут ежедневно потреблять количество корма, в 2–6,5 раз превышающее их собственную массу. Кроме влажности и питательности субстрата одним из факторов, определяющих эффективность переработки субстрата, является физическая структура питательного субстрата. Как отмечают Барраган-Фонсека и др. (Barragan-Fonseca K.B. et al., 2017) важными для продуктивности и выживаемости являются глубина слоя, плотность и однородность питательного кормового субстрата. Бритс (Brits D., 2017) предположил, что личинкам требуется больше энергии для потребления субстратов с крупными частицами, чем с мелкими (диапазон от 1 до 9 мм). Кроме того, неоднородный субстрат имеющий зоны с разным составом питательных веществ, через которые личинкам приходится перемещаться, приводит к снижению эффективности биоконверсии. Лиланд и др. (Liland N.S. et al., 2017) указывают на размер частиц около 0,15 мм, который может быть предпочтительным для личинок. Ким и др. (Kim W.T. et al., 2010) сообщили, что ширина головной капсулы у личинок с 1го по 6й возраст составляет от 0,1 до 1,1 мм, что сопоставимо с предпочтительным размером частиц около 0,15 мм, предложенным Лиландом и др. (Liland N.S. et al., 2017).

Пищеварительный тракт насекомых начинается с ротового аппарата. Верхнечелюстной рашпиль, а также лациниальные зубы ротового аппарата личинки используются для измельчения частиц субстрата. Затем предварительно обработанные частицы попадают в глотку и достигают «дробильной мельницы», где они измельчаются ещё сильнее (Bruno D. et al. 2020). После ротовой полости следует кишечник, который делится на три основные части, которые по мнению Ким и др. (Kim W.T. et al., 2010) являются различными функциональными единицами. Как сообщает Холтоф и др. (Holtorf M. et al., 2019) подобная организация пищеварительной системы сохраняется у всех насекомых. Желудочно-кишечный тракт состоит из: а) передней кишки - передней части пищеварительного канала, отвечающей за поглощение, хранение и расщепление пищи, б) средней кишки, где происходит переваривание пищи и всасывание питательных веществ, и в) задней кишки, которая отвечает за реабсорбцию воды и ионов, поступающих из содержимого задней кишки, а также мочи, выводимой из мальпигиевых канальцев, которые попадают в заднюю кишку (Dow J.A., 1987; Watanabe H., Tokuda G., 2010; Bonelli M. et al., 2019). Как сообщает Карасов и Дуглас (Karasov W.H., Douglas A.E., 2013), аминокислоты также всасываются в задней кишке, поступая из мальпигиевых сосудов. Всасывание аминокислот в

задней кишке насекомых отличается от общепринятой концепции у позвоночных, у которых в этом отделе кишечника аминокислоты не всасываются.

В средней кишке содержимое ферментируется. В связи с этим Бонелли и др. (Bonelli M. et al., 2019) и Бруно и др. (Bruno D. et al., 2019) представили данные о морфофункциональной регионализации средней кишки, влияющей на активность пищеварительных ферментов и состав микробиоты. Бруно и др. показали, что в передней части средней кишки наблюдается самое высокое микробное разнообразие, которое постепенно снижается по мере продвижения по средней кишке (Bruno D. et al., 2019). Однако согласно обзору Де Смет и др. (De Smet J. et al., 2018), бактериальные сообщества могут быть обнаружены во всех частях кишечника.

Отдельные участки средней кишки имеют определённые значения pH в просвете, а также структурные и функциональные особенности, различия в плотности микроорганизмов и составе микробиоты (Bruno D. et al., 2019). В передней части средней кишки значение pH составляет около 6 ед., а во второй части средней кишки происходит начальное закисление содержимого кишечника, в результате чего pH составляет около 2 ед. В задней части этого сегмента кишечника pH щелочной (среднее значение pH 8,3) (Bonelli M. et al., 2019).

У обыкновенной плодовой мушки (*Drosophila melanogaster*) так называемые медные клетки накапливают медь и участвуют в закислении просвета передней части средней кишки до pH 2, как это было описано для чёрной львинки (Dubreuil R.R. 2004). Медные клетки плодовой мушки схожи с париетальными клетками желудка млекопитающих, вырабатывающими кислоту. Бруно и др. (Bruno D. et al., 2019) не удалось выявить наличие клеток, содержащих медь, в кишечном эпителии взрослых особей чёрной львинки. Возможно, именно поэтому у взрослых особей не было обнаружено перитрофического матрикса, который обеспечивает механическую защиту кишечного эпителия (Bruno D. et al., 2019). Эта селективно проницаемая мембрана окружает проглоченную пищу в средней кишке, предотвращая прямой физический контакт с энтодермальными микроворсинчатыми клетками (Dow J.A., 1987). У личинок индийской зерновки *Plodia interpunctella* была выявлена важная роль перитрофической матрицы в повышении эффективности пищеварения (Sajjadian S.M., Hosseininaveh V., 2015). Вероятно, это общий механизм, присутствующий и у чёрной львинки. Средняя кишка состоит из однослойного эпителия, у имаго в основном - из столбчатых клеток, которые имеют разную толщину в разных отделах кишечника и характеризуются базальной складчатостью и апикальными микроворсинками. В цитоплазме эпителиальных клеток видны гранулы гликогена и шероховатый эндоплазматический ретикулум (Bruno D. et al. 2019).

В кишечнике чёрной львинки происходят важные физиологические адаптации в зависимости от питательности рациона. Например, длина микроворсинок в задней части средней кишки увеличивается в ответ на рацион с низкой плотностью питательных веществ (Bonelli M. et al., 2020), что свидетельствует об адаптации, направленной на повышение эффективности всасывания в кишечнике. Кроме того, Голд и др. (Gold M. et al., 2020) обнаружили, что время пребывания пищи в различных отделах средней кишки личинки зависит от содержания белка и углеводов (кроме волокон).

Способность львинки переваривать различные виды органических веществ связана с ферментами слюнных желез и особенно желудочно-кишечного тракта. По сравнению с личинками домашней мухи (*Musca domestica*), личинки чёрной львинки показывают более высокие количества и активность лейциновой ариламидазы, β -галактозидазы и α -фукозидазы в слюне, а также α -галактозидазы, α -маннозидазы и α -фукозидазы в кишечнике (Kim W. et al., 2011). Основными пищеварительными ферментами желудочно-кишечного тракта у них являются амилазы, липазы и трипсин- и химотрипсин-подобные протеазы, что подтверждает тот факт, что это насекомое относится к группе полифагов (Kim W. et al., 2011, Kim W.-T. et al., 2011, Intayung D. et al., 2021). Конкретная активность ферментов зависит от pH. Ли и др. и Сонг и др. обнаружили соответственно α -галактозидазу и эндо-1,4- β -манназу в кишечных

микроорганизмах *H. illucens* (Lee C.-M. et al., 2018, Song J. et al., 2018). Они экспрессировали рекомбинантные белки rAgas2 и rManEM17 в *E. Coli* и обнаружили, что наибольшая активность наблюдается при 40°C и pH 7,0 (rAgas2) и при 55°C и pH 6,5 (rManEM17) соответственно. Как сообщает Бонелли и др. в передней части средней кишки наблюдалась самая высокая активность растворимой амилазы, а также некоторая активность липазы (Bonelli M. et al., 2019). В средней части средней кишки была обнаружена активность лизоцима, а также основная активность липазы и трипсиноподобных и химотрипсиноподобных эндопептидаз. В задней части средней кишки была обнаружена в основном активность липазы (Bonelli M. et al. 2019). Насекомые-полифаги способны синтезировать широкий спектр протеолитических ферментов для переваривания разнообразных белков, содержащихся в нескольких видах пищи. Например, в BSFL была обнаружена химотрипсиноподобная и трипсиноподобная протеаза с пространственно и временно различающимися паттернами экспрессии (Kim W.-T. et al., 2011).

Активность пищеварительных ферментов зависит от рациона (Gold M. et al., 2018), pH среды в кишечнике (Meneguz M. et al. 2018) и температуры окружающей среды (Bonelli M. et al. 2019). Антипитательные факторы в субстрате также могут влиять на эффективность пищеварения, как показали ингибиторы ферментов, полученные из пшеницы и ячменя, которые влияют на активность α -амилазы и трипсиноподобных ферментов у *Spodoptera frugiperda* (Alfonso J. et al., 1997). Во время кормления личинок температура субстрата может достигать 45°C, что является оптимальной температурой для протеолитической активности при pH ~ 8 в задней части средней кишки личинок и значительно повышает эффективность биоконверсии субстрата (Bonelli M. et al. 2019, Kim W. et al. 2011). Кроме того, Менегуз и соавторы (Meneguz M. et al., 2018) предположили, что существует связь между щелочным pH и активностью протеаз. Они показали, что львинка может подщелачивать субстрат до pH 9,4, и предположили, что pH окружающей среды может способствовать росту определённых бактерий, что благоприятно сказывается на развитии личинок.

Джеон и соавторы (Jeon H. et al., 2011) сообщают, что особенности уникального бактериального сообщества в кишечнике личинок чёрной львинки можно изменить, скорректировав рацион. Это также было продемонстрировано на разных сегментах средней кишки при использовании различных субстратов, например, рыбы или овощной смеси (Bruno D. et al., 2019). Кроме того, на биоразнообразие влияют уровень содержания микробиоты в рационе и время воздействия. Таким образом, можно предположить, что состав микробиоты непостоянен и зависит от окружающей среды (Boccazzi I.V. et al., 2017). Работа Винантса и др. (Wynants E. et al., 2019) показала, что качество и состав микробного сообщества у личинок связаны с микробным составом субстрата. Но на основании полученных результатов они пришли к выводу о возможном наличии основного микробного сообщества у насекомого, хотя и с разной численностью. Напротив, Кламштайнер и др. (Klammsteiner T. et al., 2020) отметили незначительное влияние типа питания на микробиом кишечника личинок чёрной львинки и предположили наличие основной микробиоты, состоящей из таксонов с низкой численностью (например, *Actinomyces* spp., *Dysgonomonas* spp. и *Enterococcus* spp.), которые выполняют функции, необходимые для роста личинок в различных средах. Таким образом, вполне вероятно, что в желудочно-кишечном тракте присутствует основная микробиота, но для определения видов, участвующих в этом процессе, и их роли необходимы дальнейшие исследования.

Процессы транспортировки и хранения усвоенных питательных веществ на личиночной стадии развития имеют решающее значение, поскольку они непосредственно влияют на развитие личинок, состав биомассы и ее пригодность для последующей переработки. Центральное место в этих процессах занимают гемолимфа и жировое тело - два жизненно важных компонента физиологии насекомых. Гемолимфа, жидкость, циркулирующая в организме насекомых, выполняет важную роль в транспортировке питательных веществ, гормонов и метаболитов, а также обеспечивает иммунную защиту от патогенов (Jungreis A.M., 1980; Kanost M.R., 2009;

Blow F. and Douglas A.E., 2019). Жировая ткань тела распределена вокруг внутренних органов и является основным местом хранения жиров, углеводов и белков. Эта ткань активно участвует в регуляции энергетического баланса, контролируя запасы жира и гликогена. Также она является источником белков гемолимфы и других метаболитов. Важно отметить, что ткань продуцирует и выделяет ключевые белки, такие как гексамерины, липофорины и вителлогенины. Эти белки играют незаменимую роль в процессах роста, метаморфоза и репродукции (Kilby B.A., 1963, Haunerland N.H., 1996, Arrese E.L., Soulages J.L., 2010, Mani K. et al., 2016).

Жировое тело управляет запасами липидов в виде цитоплазматических липидных капель с помощью двух белков-накопителей липидов: белка-накопителя липидов 1, который регулирует расщепление липидов, и жидкий белок в виде капель №2, который способствует накоплению липидов (Arrese and Soulages, 2010). Глюкоза, запасенная в виде гликогена в жировом теле, превращается в трегалозу, основной сахар в гемолимфе, который поддерживает выработку энергии и синтез цинка (Steele, 1982; Arrese and Soulages, 2010).

В связи с тем, что *H. illucens* прекрасно развивается в разлагающихся органических веществах, личинки подвергаются постоянному воздействию широкого спектра микробных сообществ. Личинка реагирует на такое воздействие накоплением антимикробных пептидов и других метаболитов (Vogel H. et al., 2018; Opatovsky I. et al., 2021; Pei Y. et al., 2022; Van Moll L. et al., 2022; Mani K. et al., 2024; Herman N. et al., 2024).

2. Органические отходы – основа для биоконверсии питательных веществ в биомассу личинок насекомого

Уникальность чёрной львинки заключается в том, что ее личинки способны переработать практически любые органические отходы с минимальным выбросом парниковых газов в атмосферу и преобразуя их в высококачественный белковый корм. Чёрная львинка признана высокоэффективным инструментом для биоконверсии разнообразных органических отходов, что подтверждается многочисленными исследованиями (Amrul N.F. et al., 2022).

Личинки чёрной львинки способны потреблять чрезвычайно широкий спектр органических субстратов. Отходы можно классифицировать по происхождению:

- пищевые и кухонные отходы: остатки приготовления пищи, просроченные продукты, отходы ресторанов и столовых. Это гетерогенная смесь, богатая углеводами, жирами и белками. Исследования показывают, что такие отходы являются одним из наиболее эффективных субстратов. Например, личинки, выращенные на остатках из университетской столовой (UCL), продемонстрировали максимальные показатели конечной массы (3,15 г), длины (17,0 мм), содержания сырого протеина (38,9%) и сырого жира (39,06%) (Zandi-Sohani N., Tomberlin J.K., 2024);

- отходы растениеводства и переработки: жом сахарного тростника, морковный жмых, выжимки фруктов и овощей, пивная дробина, солома. Эти субстраты часто богаты клетчаткой и углеводами, но могут иметь дефицит протеина. Их эффективность повышается при смешивании с более питательными компонентами. Так, морковный жмых в смеси с хлебом (50/50) показал хорошие результаты (масса 1,41 г, протеин 38,7%) (Tschirner M., Simon A., 2015), в то время как чистый жом сахарного тростника в сочетании с мелассой приводил к крайне слабому росту из-за создания неблагоприятной вязкой среды) (Zandi-Sohani N., Tomberlin J.K., 2024);

- отходы пищевой промышленности: патока, барда, отходы кондитерского и хлебобулочного производств. Барда, побочный продукт дистилляции, богата органическими веществами и может быть перспективным субстратом в комбинации с другими материалами %) (Zandi-Sohani N., Tomberlin J.K., 2024). Однако диеты с очень высоким содержанием липидов (например, смесь хлеба и печени) могут полностью ингибировать развитие и окукливание личинок (Zhang Q.-H., 2025);

- отходы животноводства: птичий помет, навоз КРС и свиней. Личинки не только утилизируют эти отходы, но и снижают количество патогенных микроорганизмов (Некрасов Р.В. и др., 2019). Состав личинок, выращенных на навозе, может включать до 42.8% белка и 36.5% жира (Nekrasov R.V. et al., 2016). Смешивание навоза с другими отходами (например, с соевой опарой) оптимизирует процесс (Rehman K.U. et al., 2017);

- прочие отходы: рыбные отходы, отработанное зерно, осадки сточных вод (после соответствующей подготовки) (Nguye T.T.X. et al., 2013; Oonincx D.G.A.B. et al., 2015). Эти субстраты могут обогащать биомассу личинок специфическими жирными кислотами (например, омега-3 из рыбных отходов) (Ewald N. et al., 2020).

Питательная ценность субстрата является ключевым фактором, определяющим все аспекты эффективности биоконверсии. Ключевым для достижения высокой продуктивности личинок является формулирование субстрата на основе оптимального соотношения белков и углеводов (Gold M. et al., 2020). Субстраты, сбалансированные по белку и углеводам, обеспечивают наилучшие темпы роста. Дефицит протеина (часто встречающийся в отходах растительного происхождения) приводит к увеличению длительности личиночной стадии и снижению конечной массы (Nguye T.T.X. et al., 2013; Oonincx D.G.A.B. et al., 2015). И, наоборот, добавление белковых компонентов (например, дрожжей, зерновых отходов) к углеводистому субстрату ускоряет развитие (Некрасов Р.В. и др., 2025).

Эффективность преобразования субстрата в биомассу личинок (ECI – Efficiency of Conversion of Ingested food) варьирует. Личинки эффективно используют богатые белком диеты, но могут менее эффективно усваивать низкобелковые (Oonincx D.G.A.B. et al., 2015). Валидным показателем является индекс редукации отходов (WRI), который может достигать высоких значений при оптимальных условиях. На скорость биоконверсии также влияет плотность посадки личинок и влажность субстрата (Ewald N. et al., 2020; Lalander C. et al., 2019; Nguye T.T.X. et al., 2013).

Исследования показывают, что уровень лауриновой кислоты и общая антибактериальная активность экстрактов личинок коррелируют с питательным составом субстрата, в частности с содержанием в нём жиров и доступной энергии (Franco A., et al., 2024).

Состав субстрата является решающим фактором для микробного профиля и безопасности биомассы личинок. Личинки чёрной львинки обладают собственной иммунной системой и способны снижать количество патогенов. Микробная нагрузка личинок напрямую зависит от исходного содержания микроорганизмов в субстрате. При выращивании на различных потоках пищевых отходов в личинках и зоокомпосте обнаруживались, в основном, спорообразующие бактерии (*B. cereus*, *C. perfringens*) и дрожжи/плесени, в то время как такие патогены, как *Listeria monocytogenes*, *Salmonella spp.*, *E. coli* и *S. aureus*, часто отсутствовали или были ниже предела обнаружения (Alagappan S. et al., 2025). Наибольшее количество микроорганизмов фиксировалось в личинках, выращенных на более простых, гомогенных отходах. При этом личинки способны продуцировать широкий спектр антимикробных пептидов (АМП) и жирных кислот с бактерицидной активностью. Интенсивность синтеза этих соединений зависит от качества субстрата. Экстракты личинок, выращенных на богатых углеводами и жирами растительных отходах, демонстрируют значительно более высокую антибактериальную активность против тест-патогенов, включая *S. aureus*, *B. subtilis*, *E. coli* и *P. aeruginosa*, чем экстракты личинок с навозных субстратов (Franco A. et al., 2024).

Наиболее выраженной активностью обладают экстракты, полученные с использованием 20% уксусной кислоты, что указывает на пептидную природу многих антимикробных соединений. Практическое значение имеют возраст личинок и постобработка. Микробная нагрузка в личинках 6-го возраста (предкуполка) статистически ниже, чем в личинках 5-го возраста, что связывают с накоплением антимикробных жирных кислот и опустошением кишечника перед окукливанием. Термическая обработка (сушка) эффективно снижает

количество вегетативных клеток и дрожжей/плесеней, однако может быть недостаточной для полного уничтожения термоустойчивых спор *C. perfringens* (Alagappan S. et al., 2025). Таким образом, для обеспечения микробной безопасности продукта в промышленных масштабах необходим строгий контроль исходного субстрата и применение эффективных постобработок.

Содержание сырого протеина в личинках обычно колеблется от 35% до 45% на сухое вещество, но может достигать 52,3% при выращивании на барде (Tschirner M., Simon A., 2015) или падать ниже 35% на некоторых субстратах. При этом аминокислотный профиль личинок остается относительно стабильным и полноценным, что свидетельствует о их способности к синтезу незаменимых аминокислот (Spranghers T. et al., 2017; Некрасов Р.В. и др. 2025).

Содержание липидов более вариабельно (9–39% на СВ) и сильно зависит от субстрата. Диеты, богатые углеводами, могут способствовать синтезу жиров, преимущественно насыщенных жирных кислот (Ewald N. et al., 2020; Zandi-Sohani N., Tomberlin J.K., 2024). Лауриновая кислота (C12:0) часто является доминирующей, составляя до 48% от общего пула жирных кислот на отходах столовой (Zandi-Sohani N., Tomberlin J.K., 2024). Профиль жирных кислот можно модифицировать через диету: например, скармливание рыбных отходов увеличивает долю длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот (Ewald N. et al., 2020).

Зольность личинок и содержание макро- и микроэлементов (калий, натрий, цинк, железо) также коррелируют с составом субстрата (Zandi-Sohani N., Tomberlin J.K., 2024). Питание на личиночной стадии имеет отложенные последствия, влияя на жизнеспособность и репродуктивность взрослых мух (Zhang Q.-H., 2025). Это критически важно для обеспечения устойчивого цикла производства.

Размер и качество имаго зависят напрямую от диеты: субстраты богатые углеводами, но с умеренным содержанием белка и жира, способствуют увеличению массы куколок и взрослых самок. Крупные самки, как правило, обладают большей плодовитостью. Масса самки положительно коррелирует с общей массой отложенных яиц. Однако более высокая яйценоскость не всегда означает лучшую выводимость. Диеты, приводящие к максимальному росту личинок и самок (например, комбикорм), могут давать больше яиц, но с более низким процентом вылупления на пике яйцекладки по сравнению с диетами на пищевых отходах. Продолжительность личиночной стадии и последующей непитающейся стадии (предкуколка) влияет на время начала откладки яиц. Более длительное питание личинок и короткий период до вылета имаго ассоциированы с более ранним началом яйцекладки (Zhang Q.-H., 2025).

Для достижения промышленного успеха в выращивании чёрной львинки оптимизация физических параметров субстрата является не менее важной задачей, чем подбор его питательного состава. На процесс переработки и развития личинок комплексно влияет как состав исходного сырья, так и параметры процесса (Lalander C. et al., 2019). Ключевым технологическим приёмом выступает предварительная обработка исходных отходов, причём выбор метода имеет решающее значение. Как показало исследование Пегуэро и др. (2024), механическое измельчение демонстрирует явное преимущество перед термической обработкой для повышения эффективности биоконверсии волокнистых субстратов. В то время как нагрев до 90°C в течение от 0.5 до 4 часов не улучшил, а в некоторых случаях даже снизил показатели роста личинок на навозе, пивной дробине и травяной резке, измельчение тех же дробины и травы до размера частиц 0.5 мм привело к значительному росту продуктивности. Для пивной дробины и травяной резки скорость и эффективность конверсии белка возросла на 40% и 24% соответственно. Однако эти результаты выявили важную зависимость от типа сырья: если для травяной резки положительный эффект был стабильным, то для пивной дробины он проявлялся не всегда, что указывает на критическую важность взаимодействия измельчения с другими условиями культивирования, такими как плотность посадки и геометрия культивационных ёмкостей. Помимо измельчения, для оптимизации субстрата применяют смешивание различных типов отходов для достижения баланса нутриентов и влажности, а также ферментацию с помощью

микроорганизмов для повышения усвояемости трудноразлагаемых компонентов, таких как солома (Peguero D.A. et al., 2024).

Успех процесса биоконверсии также сильно зависит от поддержания ключевых физико-химических параметров в оптимальном диапазоне. Влажность субстрата является одним из таких критических факторов: её уровень в 60-75% создаёт идеальные условия для активности личинок и аэробных микроорганизмов, в то время как снижение влажности ниже 50% замедляет метаболизм, а превышение 80% приводит к уплотнению среды, анаэробным процессам и затруднениям при сепарации личинок от зоокомпоста. (Nguyen T.T.X. et. al., 2013; Некрасов, Р.В. и др., 2019). Личинки чёрной львинки толерантны к широкому диапазону кислотности (pH 6-10), хотя условия, близкие к нейтральным или слабощелочным, являются предпочтительными; в процессе жизнедеятельности личинки сами подщелачивают среду. Не менее важны параметры посадки: оптимальная поверхностная плотность (около 5 личинок/см²) и норма кормления (примерно 100 мг сухого вещества на личинку в день) позволяют максимизировать рост и минимизировать стресс и каннибализм (Антонов А.М. и др., 2018). При этом, как подчёркивается в исследовании Peguero et al. (2024), при проектировании промышленных установок необходимо учитывать не только поверхностную, но и объёмную плотность посадки, поскольку именно она в большей степени определяет микроклимат и доступность ресурсов в толще субстрата (Антонов А.М. и др., 2018; Peguero D.A. et. al., 2024).

Механическая подготовка оказывает комплексное влияние на систему, выходящее за рамки простого увеличения площади поверхности. Он напрямую изменяет физическую структуру среды, что, в свою очередь, модулирует активность микробиоты. В том же исследовании было зафиксировано, что измельчение субстрата влияет на паттерны микробного дыхания. Для травяной резки уменьшение размера частиц стимулировало первоначальный всплеск микробной активности, что могло способствовать предварительной ферментации и улучшению питательной доступности для личинок. Для пивной дробины наблюдалась противоположная динамика, что, вероятно, было связано с резким увеличением насыпной плотности и сокращением свободного воздушного пространства в субстрате после измельчения, что ограничило аэрацию и подавило активность аэробных микроорганизмов. Этот контрастный эффект наглядно демонстрирует критическую важность таких физических свойств субстрата, как насыпная плотность и пористость, которые становятся ключевыми факторами, определяющими газообмен и, следовательно, доступность кислорода как для симбиотических микроорганизмов, так и для самих личинок. Таким образом, технология подготовки субстрата представляет собой комплексную задачу, где механическое измельчение, управление влажностью, кислотностью, плотностью посадки и аэрацией тесно взаимосвязаны, и их совместная оптимизация необходима для достижения максимальной эффективности биоконверсии в промышленных масштабах (Peguero D.A. et. al., 2024).

Использование кормовых отходов для выращивания чёрной львинки имеет двойную пользу. Снижение объема органических отходов на 50-80%, уменьшение выбросов метана и производство стабилизированного удобрения (зоокомпоста), что способствует переходу к циркуляционной экономике и сохранению экологии (Некрасов, Р.В. и др., 2019; Purkayastha D., Sarkar S., 2022).

Создание устойчивого источника высококачественного кормового белка и жира, снижающего зависимость от рыбной муки и сои (Nekrasov R.V. et al., 2016; Spranghers, T. et. al., 2017; Некрасов, Р.В. и др., 2019). Личинки успешно тестируются в рационах птицы, свиней, рыб и домашних животных (Nekrasov R.V. et al., 2016; Sogari G. et. al., 2019; Некрасов, Р.В. и др., 2019).

3. Химический состав личинок чёрной львинки как основа получения кормовых средств

Наиболее распространенным кормовым продуктом, получаемым из биомассы личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*), являются сушеные личинки. Продукт представляет собой цельные или измельченные личинки, прошедшие термическую обработку обезвоживания с целью консервации. Высокое содержание сырого протеина и жира в его составе определяет его пищевую ценность. Согласно различным данным, содержание белка варьируется от 30 г до 47 г/100 г сухого вещества (СВ) (Jayanegara A. et al., 2017; Shumo M., Osuga I.M., 2019; Ewald N. et al., 2020; Barrera J. et al., 2023), содержание жира — от 20 до 57 г/100 г (СВ), а содержание хитина — от 2 до 9 г/100 г СВ. Содержание кальция составляет 840-934 мг/100 г, железа (2,1-3,0 мг/100 г и цинка 6,8-15 мг/100 г (Finke M.D. 2012; Bessa L.W. et al., 2017; Monisha C., Loganathan M., 2021).

Количество и качество протеина в биомассе личинок *Hermetia illucens* (чёрная львинка) напрямую зависит от нутриентного состава субстрата. В рамках научной работы Шафан Ю. и его команда провели эксперимент на 12 различных субстратах, которые были получены путем различных комбинаций пивной дробины ячменя, кукурузы и сорго с добавлением воды, пивных дрожжей и тростниковой мелассы. Проведенные исследования показали, что общий диапазон протеина по всем субстратам составил 30-46% от сухого вещества. Максимальное содержание протеина (45,7%) было отмечено в варианте кормовой смеси на основе сорго и ячменя с добавлением пивных дрожжей. Минимальная концентрация сырого протеина 29,9% - зафиксирована в группе, получавшей комбинированный субстрат из дробины ячменя в смеси дрожжей и мелассы. Субстрат на основе сорго и ячменя с добавками (дрожжи или дрожжи + меласса) обеспечивал не только максимальный уровень протеина, но и наивысшие концентрации большинства критически значимых минеральных элементов (P, K, Mg, Fe, Zn, Mn) (Shaphan Y. et al., 2020).

Химический состав кормового субстрата является ключевым фактором, определяющим направленность метаболизма личинок (*Hermetia illucens*) и, следовательно, соотношение макронутриентов в накопленной биомассе. Высокоуглеводные диеты с низким содержанием белка индуцируют липогенез *de novo*, конвертируя избыток углеводов в липиды, что приводит к экстремально высокому содержанию жира в ущерб протеину. В показательном исследовании Нильс Эвальд с соавторами (Ewald N. et al., 2020) определили, что культивирование личинок на хлебном субстрате (богатом крахмалом) обеспечило содержание сырого жира на уровне 57,8% и сырого протеина лишь 29,8% от сухой массы, что является прямым следствием высокой углеводной нагрузки. Данный эффект закономерен и воспроизводим: субстраты с высоким соотношением C/N (углерод/азот), такие как фруктовые отходы или зерновые, стабильно продуцируют биомассу с высоким содержанием липидов (до 35–45% и выше), тогда как диеты, богатые белком и сбалансированные по C/N (например, рыбные отходы или комбинированные корма с добавлением азота), смещают метаболизм в сторону синтеза протеина (Barroso F.G. et al., 2019; Ewald N. et al., 2020). Таким образом, манипуляция рационом позволяет программировать состав личинок.

3.1. Аминокислотный состав

Для повышения концентрации протеина в муке применяют технологию обезжиривания биомассы. Наиболее распространенный метод — механическое разделение с использованием шнекового маслопресса. Предварительно высушенные личинки подвергаются прессованию, в процессе которого экстрагируется значительная часть липидной фракции. Обезжиренная мука обладает низкой влажностью — (не более 6 – 7%) с повышенной концентрацией протеина (до 62,2%) с низким содержанием жира (менее 10%), присутствует хитин — (до 9,5%), а энергетическая ценность составляет — 200 ккал/100 г, что делает продукт ценным

высокобелковым ингредиентом для комбикормов, где необходим точный контроль протеина и энергии - например, для стартовых рационов молодняка, дойных коров или некоторых видов аквакультуры (Романенко Е.А., 2023).

Кормовая ценность протеина определяется его аминокислотным составом, причем оптимальный профиль аминокислот специфичен для каждого вида животных в зависимости от их физиологического состояния. Потребность в протеине складывается из нужд организма для поддержания жизни, а также для обеспечения роста, репродукции, лактации или откорма. Если количество или качество белка в рационе не соответствует этой потребности — будь то дефицит, избыток или дисбаланс аминокислот - это нарушает физиологические функции организма животного, что снижает продуктивность и может привести к метаболическим расстройствам.

В таблице 1 представлен анализ аминокислотного состава личинок *Hermetia illucens*. Полученные данные свидетельствуют о том, что данный продукт может рассматриваться в качестве ценного источника белка для кормления животных. Состав аминокислот (г/кг) личинок *H. illucens* (Monisha C., Loganathan M., 2021; Тышко Н.В. и др., 2021).

Таблица 1. Аминокислотный состав личинок чёрной львинки

Аминокислота, г/кг	Личинки мухи чёрной львинки	
	Нативная мука	Обезжиренная мука
Незаменимые аминокислоты		
Аргинин	12,3–19,9	20,7
Гистидин	5,94–13,8	16,3
Изолейцин	7,62–19,1	24,0
Лейцин	12,1–30,6	36,7
Лизин	11,9–23,0	25,2
Метионин	3,37–7,1	8,56
Фенилаланин	7,56–16,4	21,8
Треонин	6,82–16,2	21,8
Триптофан	3,0–5,4	-
Валин	12,9–28,2	34,5
Заменимые кислоты		
Аланин	12–27,8	43,7
Аспарагиновая кислота	16,5–36,9	48,8
Цистеин	1,02–2,2	0,2
Глутаминовая кислота	19,7–45,8	63,7
Глицин	9,14–25,2	30,3
Пролин	10,2–25,1	32,7
Серин	7,02–15,9	26,8
Тирозин	12,1	34,1

Как обезжиренная, так и полножирная мука из личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*) обладает богатым аминокислотным составом. Наиболее распространенные в муке незаменимые аминокислоты представлены лейцином (от 12,1 до 30,6 г/кг), лизином (от 11,9 до 23,0 г/кг) и валином (от 12,9 до 28,2 г/кг). Исследования показывают, что содержание аминокислот меняется в течение жизни чёрной львинки, при этом более высокие уровни незаменимых аминокислот наблюдаются у более молодых личинок, в возрасте от 4–6 дней (Liu X. et. al., 2017).

На содержание аминокислот также влияют способы обработки, такие как метод умерщвления. Замораживание активирует ферментативные пути, что приводит к потере цистеина и лизина, тогда как бланширование не оказывает негативного влияния на аминокислотный профиль. Предполагается, что цистеин и лизин участвуют в реакциях ферментативного потемнения, что объясняет их потери в замороженных личинках (Leni G. et. al., 2019).

3.2. Липидный состав

Жир, получаемый после прессования или экстракции личинок, является ценным энергетическим кормовым компонентом с уникальным профилем жирных кислот, близким по составу к кокосовому маслу и маслу пальмового ядра благодаря высокой концентрации среднецепочечных жирных кислот, в частности лауриновой кислоты (C12:0). Её доля может достигать 51,2–58,93% в зависимости от субстрата и стадии развития личинки (Nekrasov R. V. et al., 2021). Эвальд и др. (Ewald N. et al., 2020) выявили положительную корреляцию между массой личинок и процентным содержанием лауриновой кислоты, а также общим количеством насыщенных жирных кислот (НЖК). Авторы (Li X. et al., 2022) предположили, что НЖК накапливаются в наибольшей степени по мере увеличения массы личинок.

Для достижения максимального выхода липидной фракции из биомассы личинок чёрной львинки (*Hermetia illucens*) наиболее эффективным методом является экстракция с использованием органических растворителей, таких как н-гексан. Этот метод основан на способности липидных веществ хорошо растворяться в органических растворителях. Важно отметить, что экстракция растворителем часто применяется в комбинации с предварительным механическим отжимом, что позволяет извлекать остаточные липиды из обезжиренного жмыха, и соответствует принципам безотходной переработки сырья. Так, К.С. Сурендра и др. с помощью механического прессования из 100 г предкуколки чёрной львинки получили 15–20 г сырого масла и 80–85 г жмыха. Это соответствует извлечению 40–50% жира от его исходного содержания в биомассе. Последующая экстракция прессованного и измельченного материала органическим растворителем позволила извлечь еще около 90% оставшегося жира, что в сумме обеспечило практически полное обезжиривание сырья (Surendra K.C., Olivier R., 2016).

Качественный состав жира также зависит от количества и качества липидов в рационе личинки. В исследовании Фернандо Г. Барросо и др. выявили, что личинки чёрной львинки, получавшие экспериментальный рацион, обогащенный n-3 жирными кислотами за счёт включения рыбной муки и рыбьего жира, имели статистически значимо более высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот по сравнению с контрольными личинками, выращенными на стандартном корме. Содержание омега-3 жирных кислот в опытной группе было в три раза выше, чем в контроле, что сопровождалось благоприятным снижением соотношения n-6: n-3 (Barroso F.G. et. al., 2017).

В последующей работе этих же авторов при использовании рыбных отходов в качестве источника длинноцепочечных ПНЖК сумма n-3 жирных кислот в личинках возросла с 4,3% в контроле до 14,8% в опытной группе после 12 дней кормления, причём содержание эйкозапентаеновой кислоты (ЭПК) достигло 7,2%, а докозагексаеновой (ДГК) - 4,9% от суммы жирных кислот ($p < 0,001$) (Barroso F.G. et. al., 2019). Таким образом, меняя состав кормового субстрата, можно добиться направленного обогащения личинок чёрной львинки необходимыми жирными кислотами. Подробный перечень жирных кислот представлен в таблице 2 (Nekrasov R.V. et al., 2022).

Состав жира личинок чёрной львинки характеризуется низким содержанием мононенасыщенных (СЦЖК) и полиненасыщенных (ПНЖК) жирных кислот с преобладанием насыщенных (НЖК): лауриновой – 58,93 г/кг пальмитиновой – 16,1 г/кг миристиновой – 12,0 г/кг; стеариновой – 2,0 г/кг.

Благодаря высокой концентрации среднецепочечных жирных кислот (СЦЖК), этот продукт обладает выраженными антибактериальными, противовирусными свойствами. Высокая степень насыщенности (до 76% насыщенных жирных кислот) обеспечивает отличную стабильность жира при хранении, предотвращая его быстрое окисление (Boyen, F. et. al., 2008).

Таблица 2. *Жирнокислотный состав высушенных личинок чёрной львинки*

Жирная кислота	Содержание ЖК, г/кг
Каприновая кислота 10:0	0,69–1,57
Лауриновая кислота 12:0	51,2–58,93
Миристиновая кислота 14:0	11,11–12,0
Миристолеиновая кислота 14:1	0,45–0,50
Пентадекановая кислота 15:0	0,12–0,31
Пальмитиновая кислота 16:0	12,68–16,1
Пальмитолеиновая кислота 16:1	4,96–2,17
Гептадекановая кислота 17:0	0,20
Гептадеценовая кислота 17:1	0,1–0,08
Стеариновая кислота 18:0	1,24–2,0
Олеиновая кислота 18:1	7,39–15,6
Линолевая кислота 18:2	3,52–16,9
Линоленовая кислота 18:3	0,65
Арахидический 20:0	0,16
Эйкозеновая кислота 20:1	<0,08
Эйкозодиеновая кислота 20:2	<0,10
Арахидоновая кислота 20:4	<0,08
Докозановая (бегеновая) кислота 22:0	0,09

СЦЖК могут использоваться в качестве источника энергии, улучшая доступность энергии без увеличения отложения липидов (Van Immerseel, F. et. al., 2006). Более того, благодаря антимикробным свойствам жир личинок чёрной львинки способствует поддержанию здоровья желудочно-кишечного тракта за счет ингибирования потенциально патогенных бактерий (Baltic V.M. et. al., 2019; Li L. et. al., 2016). Ван Иммерсель и др. (Van der Hoeven-Hangoor et. al., 2013) сообщили, что у домашней птицы СЦЖК обладают наибольшей антимикробной активностью против сальмонеллы, вызывающей гастроэнтерит. СЦЖК также обладают ингибирующим эффектом, опосредованным лактобактериями (Hermans D. et. al., 2010). Кроме того, было отмечено, что добавление 3% СЦЖК в качестве бактерицидного агента снижает количество бактерий у бройлерных цыплят. Ван Герве и др. (Van Gerwe T. et. al., 2010) заявили, что добавление смеси СЦЖК в корм в количестве 1% снижает колонизацию кишечника бройлеров патогеном *Campylobacter jejuni*. С другой стороны, СЦЖК могут улучшать усвоение питательных веществ и морфологию кишечника бройлеров за счет увеличения длины ворсинок и соотношения ворсинок к криптам в двенадцатиперстной и тощей кишке (Zeitiz J. et. al., 2015). Зейгер и др. (Zeiger K. et. al., 2017) предполагают, что лауриновая кислота в качестве кормовой добавки может улучшить безопасность пищевых продуктов за счет снижения количества *Campylobacter coli* в мясе бройлеров. Фортуюзо и др. (Fortuoso B.F. et. al., 2019) показали, что монолаурат глицерина (производное лауриновой кислоты) в рационах бройлерных цыплят обладает мощным антимикробным эффектом, способностью стимулировать рост и нетоксичностью. Из всех форм среднецепочечных жирных кислот моноглицериды демонстрируют самую высокую антимикробную активность *in vitro* (Kabara J.J. et. al., 1972).

3.3. Минеральный состав

Личинки чёрной львинки (*Hermetia illucens*) обладают особым минеральным составом, который выделяет их среди других насекомых, используемых на корм. Их ключевая особенность - исключительно высокая концентрация кальция (от 5% до 8%), а также выраженная способность аккумулировать в своих тканях микроэлементы, поступающие с потребляемым органическим субстратом. Минеральный состав чёрной львинки богат фосфором (Р от 0,6% до 1,5%). Кроме

того, он включает железо (Fe от 0,14% до 14%), марганец (Mn до 24,6%), магний (Mg 0,39%), натрий (Na 0,13%), калий (K 0,69%) и цинк (Zn до 11%) (da-Silva W.C. et al., 2024).

Исследования Н. Романо (Romano N. et al., 2023) показали, что личинка чёрной львинки способна аккумулировать кальций: при кормлении банановой кожурой содержание Ca в личинках достигало 2,3–8,6%, что значительно выше, чем при использовании других фруктовых субстратов. Это позволило сформировать оптимальное соотношение Ca:P (от 1,1:1 до 2:1) для костного метаболизма животных. Аналогичная зависимость от субстрата наблюдалась и для других элементов: личинки, выращенные на банановой кожуре, демонстрировали повышенные уровни фосфора, магния, калия, натрия и марганца, тогда как апельсиновая кожура способствовала накоплению меди и никеля. При этом такие критически важные микроэлементы, как железо и цинк, оставались на относительно низком уровне во всех вариантах, что отражает исходную бедность фруктовых отходов этими минералами. Таким образом, состав личинок служит прямым индикатором питательного профиля субстрата, а целенаправленный подбор кормовой основы позволяет программировать их минеральный профиль для дальнейшего использования в качестве функциональной кормовой добавки в животноводстве и аквакультуре.

Технологическая переработка позволяет гибко использовать личинку чёрной львинки, получая из нее как сбалансированный цельный кормовой продукт, так и специализированные компоненты с целевым содержанием белка или жира для разных отраслей животноводства и аквакультуры.

Заключение

Проведенный анализ фундаментальных и практических аспектов выращивания личинок мухи чёрная львинка (*Hermetia illucens*) подтверждает высокий потенциал инсектотехнологий для модернизации кормовой базы отечественного животноводства. Личинки *Hermetia illucens* являются высокоэффективным биотрансформатором, способным за короткий жизненный цикл (около 40–45 суток) перерабатывать широкий спектр органических отходов в биомассу с содержанием сырого протеина от 35% до 62% и жира до 57%. Уникальной физиологической особенностью вида является способность к активному подщелачиванию субстрата и наличие мощной ферментативной системы полифага. Нутриентный профиль личинок не является статичным и напрямую зависит от состава питательного субстрата. Манипуляции с рационом позволяют целенаправленно изменять соотношение макронутриентов: углеводистые среды стимулируют липогенез (накопление лауриновой кислоты), а белковые - синтез незаменимых аминокислот. Биомасса характеризуется высоким уровнем кальция, железа и среднецепочечных жирных кислот, обладающих выраженными антибактериальными свойствами. Технология позволяет решать проблему утилизации органических отходов, сокращая его объем на 50–80%, снижая выбросы метана и производя вторичный продукт - зоокомпост (фрасс), обогащенный полезной микрофлорой.

Несмотря на достигнутые успехи, для полномасштабного внедрения технологий в агропромышленный комплекс РФ необходимо решение ряда научно-технологических задач, в том числе включающих разработку методов направленной биофортификации личинок эссенциальными нутриентами (длинноцепочечные омега-3 жирные кислоты, витамины, микроэлементы) путем модификации исходных субстратов; углубленное изучение динамики патогенов при переработке высокорисковых отходов (животноводческие стоки, канализационные осадки) и совершенствование протоколов постобработки (термической или СВЧ-сушки) для гарантированного уничтожения спорообразующих бактерий; дальнейшее детальное исследование антимикробных пептидов и хитиновых производных личинок для создания новых ветеринарных препаратов и иммуномодуляторов. Проведение долгосрочных опытов по изучению переваримости обезжиренной муки чёрной львинки у моногастричных животных (птица, свиньи) с учетом антипитательной роли высокого содержания хитина, а также

разработка ферментационных стратегий для его частичной деструкции также является актуальным для дальнейших исследований и разработок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, тема ГЗ № FGGN-2026-0001.

Список литературы

1. Alagappan S., Dong A., Hoffman L., Cozzolino D., Mantilla S.O., James P., Yarger O., Mikkelsen D. Microbial safety of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on food waste streams // Waste Manag. 2025. Vol. 194. P. 221-227. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.01.019.
2. Alfonso J, Ortego F, Sanchez-Monge R, Garcia-Casado G, Pujol M, Castañera P, et al. Wheat and barley inhibitors active towards α -amylase and trypsin-like activities from *Spodoptera frugiperda*. J Chem Ecol. 1997; 23(7):1729–41.
3. Amrul N.F., Kabir Ahmad I., Ahmad Basri N.E., Suja F., Abdul Jalil N.A., Azman N.A. A Review of Organic Waste Treatment Using Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) // Sustainability. 2022. Vol. 14. 4565.
4. Arrese E.L., Soulages J.L. Insect fat body: energy, metabolism, and regulation // Annu. Rev. Entomol. 2010. Vol. 55. P. 207–225. DOI:10.1146/annurev-ento-112408-085356
5. Baltic B.M., Janjic J., Brankovic Lazic I., Mrdovic B., Ciric J., Markovic R., Mitrovic R. Relationships between broiler final weights and microbiota of certain segments of the intestine // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 333. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/333/1/012045
6. 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 // J. Insects as Food Feed. 2017. Vol. 3. Nr. 2. P. 105–120. DOI:10.3920/JIFF2016.0055
7. Barrera J., Salinas E.R., Rivera A.L., et al. Productivity and Nutritive Value of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Fed with Different Waste Substrates // International Journal of Multidisciplinary: Applied Business and Education Research. 2023. Vol. 4. No. 2. P. 588 – 599. DOI: 10.11594/ijmaber.04.02.25
8. Barroso F.G., Sánchez-Muros M.-J., et al. Insects as food: Enrichment of larvae of *Hermetia illucens* with omega 3 fatty acids by means of dietary modifications // Journal of Food Composition and Analysis. 2017. Vol. 62. September. P. 8-13. DOI: 10.1016/j.jfca.2017.04.008
9. Barroso F.G., Sánchez-Muros M.-J., et al. Production of n-3-rich insects by bioaccumulation of fishery waste // Journal of Food Composition and Analysis. 2019. Vol. 11. 103237. June. DOI: 10.1016/j.jfca.2019.103237
10. Bertinetti C., Samayoa A.C., Hwang S.-Y. Effects of Feeding Adults of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on Longevity, Oviposition, and Egg Hatchability: Insights Into Optimizing Egg Production // Journal of Insect Science. 2019. Vol. 19(1). 19. P. 1–7. DOI: 10.1093/jisesa/iez001
11. Bessa L.W., Pieterse E., Marais J., Hoffman L.C. Why for feed and not for human consumption? The black soldier fly larvae // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2020. Vol. 19. P. 2747-2763. DOI: 10.1111/1541-4337.12609
12. Beuk P. L. T. Honeydew as a food source for insects and in particular for soldierflies (Diptera: Stratiomyidae) // Phegea. 1990. Vol. 18. P. 137–140.
13. Blow F., Douglas A.E. The hemolymph microbiome of insects // J. Insect Physiol. 2019. Vol. 115. P. 33–39. DOI:10.1016/j.jinsphys.2019.04.002
14. Boccazzi I.V., Ottoboni M., Martin E., Comandatore F., Vallone L., Spranghers T., et al. A survey of the mycobiota associated with larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared for feed production // PloS one. 2017. Vol. 12(8). e0182533. DOI:10.1371/journal.pone.0182533
15. Bonelli M., Bruno D., Brilli M., Gianfranceschi N., Tian L., Tettamanti G., et al. Black soldier fly larvae adapt to different food substrates through morphological and functional responses of the midgut // Int J Mol Sci. 2020. Vol. 21(14). 4955 DOI:10.3390/ijms21144955
16. Bonelli M., Bruno D., Caccia S., Sgambetterra G., Cappellozza S., Jucker C., et al. Structural and functional characterization of *Hermetia illucens* larval midgut // Front Physiol. 2019. Vol. 10. 204. DOI:10.3389/fphys.2019.00204
17. Boyen F., Haesebrouck F., Vanparys A., Volf J., Mahu M., Van Immerseel F., Rychlik I., Dewulf J., Ducatelle R., Pasmans F. Coated fatty acids alter virulence properties of *Salmonella typhimurium* and

- decrease intestinal colonization of pigs // *Vet. Microbiol.* 2008. Vol. 132. P. 319–327. DOI: 10.1016/j.vetmic.2008.05.008
18. Brits D. Improving feeding efficiencies of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae: Hermetiinae) through manipulation of feeding conditions for industrial mass rearing. Stellenbosch: Stellenbosch University; 2017.
 19. Bruno D., Bonacci T., Reguzzoni M., Casartelli M., Grimaldi A., Tettamanti G., et al. An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens* // *Arthropod Struct Dev.* 2020. Vol. 58. 100969. DOI: 10.1016/j.asd.2020.100969
 20. Bruno D., Bonelli M., Cadamuro A.G., Reguzzoni M., Grimaldi A., Casartelli M., et al. The digestive system of the adult *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): morphological features and functional properties // *Cell Tissue Res.* 2019. Vol. 378(2). P. 221–38. DOI: 10.1007/s00441-019-03025-7
 21. Bruno D., Bonelli M., De Filippis F., Di Lelio I., Tettamanti G., Casartelli M., et al. The intestinal microbiota of *Hermetia illucens* larvae is affected by diet and shows a diverse composition in the different midgut regions // *Appl Environ Microbiol.* 2019. Vol. 85. e01864–18. DOI: 10.1128/AEM.01864-18
 22. da-Silva W.C., et al. Nutritional Value of the Larvae of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) and the House Fly (*Musca domestica*) as a Food Alternative for Farm Animals—A Systematic Review // *Insects.* 2024. Vol. 15(8). 619; DOI: 10.3390/insects15080619
 23. De Smet J., Wynants E., Cos P., Van Campenhout L. Microbial community dynamics during rearing of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) and impact on exploitation potential // *Appl Environ Microbiol.* 2018. Vol. 84(9). e02722–17. DOI: 10.1128/AEM.02722-17
 24. Diener S., Zurbrugg C., Tockner K. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates // *Waste Manag. Res.* 2009. Vol. 27. P. 603–610.
 25. Dow J.A. Insect midgut function // *Advances in insect Physiology.* 1987. Vol. 19. P. 187–328. DOI: 10.1016/S0065-2806(08)60102-2
 26. Dubreuil R.R. Copper cells and stomach acid secretion in the *Drosophila* midgut // *Int J Biochem Cell Biol.* 2004. Vol. 36(5). P. 742–52. DOI: 10.1016/j.biocel.2003.07.004
 27. Ewald N., Vidakovic A., Langeland M., Kiessling A., Sampels S., Lalander C. Fatty acid composition of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*)—Possibilities and limitations for modification through diet // *Waste Manag.* 2020. Vol. 102. P. 40–47. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.10.014
 28. Finke M.D. Complete nutrient content of four species of feeder insects // *Zoo Biol.* 2012. Vol. 32. P. 27–36. DOI: 10.1002/zoo.21012
 29. Fortuoso B.F., Dos Reis J.H., Gebert R.R., Barreta M., Griss L.G., Casagrande R.A., de Cristo T.G., Santiani D. Glycerol monolaurate in the diet of broiler chickens replacing conventional antimicrobials: Impact on health, performance and meat quality // *Microb Pathog.* 2019. Vol. 129. P. 161–167. DOI: 10.1016/j.micpath.2019.02.005
 30. Franco A., Scieuzo C., Salvia R., Pucciarelli V., Borrelli L., Addeo N.F., Bovera F., Laginestra A., Schmitt E., Falabella P. Antimicrobial activity of lipids extracted from *Hermetia illucens* reared on different substrates // *Appl Microbiol Biotechnol.* 2024. Vol. 108(1). 167. DOI: 10.1007/s00253-024-13005-9.
 31. Gladun V.V. The first record of *Hermetia illucens* (Diptera, Stratiomyidae) from Russia // *Nature Conservation Research.* 2019. Vol. 4(4). P. 111–113.
 32. Gold M., Cassar C.M., Zurbrugg C., Kreuzer M., Boulous S., Diener S., Mathys A. Biowaste treatment with black soldier fly larvae: increasing performance through the formulation of biowastes based on protein and carbohydrates // *Waste Management.* 2020. Vol. 102. P. 319–329.
 33. Gold M., Egger J., Scheidegger A., Zurbrugg C., Bruno D., Bonelli M., et al. Estimating black soldier fly larvae biowaste conversion performance by simulation of midgut digestion // *Waste Manag.* 2020. Vol. 112. P. 40–51. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.05.026
 34. Gold M., Tomberlin J.K., Diener S., Zurbrugg C., Mathys A. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: a review // *Waste Manag.* 2018. Vol. 82. P. 302–18. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.10.022
 35. Hardy D.E. *Insects of Hawaii. Volume 10, Diptera: Nematocera-Brachycera.* Honolulu: University of Hawaii Press; 1960.
 36. Haunerland N.H. Insect storage proteins: gene families and receptors // *Insect Biochem. Mol. Biol.* 1996. Vol. 26. P. 755–765. DOI: 10.1016/S0965-1748(96)00035-5

37. Herman N., Vitenberg T., Hayouka Z., et al. Regulation of antimicrobial peptides in *Hermetia illucens* in response to fungal exposure // Sci. Rep. 2024. Vol. 14. 29561. DOI: 10.1038/s41598-024-80133-7
38. Hermans D., Martel A., Van Deun K., Verlinden M., Van Immerseel F., Garmyn A., Messens W., Heyndrickx M., Haesebrouck F., Pasmans F. Intestinal mucus protects *Campylobacter jejuni* in the ceca of colonized broiler chickens against the bactericidal effects of medium-chain fatty acids // Poult. Sci. 2010. Vol. 89. P. 1144–1155. DOI: 10.3382/ps.2010-00717
39. Holtot M., Lenaerts C., Cullen D., Broeck J.V. Extracellular nutrient digestion and absorption in the insect gut // Cell Tissue Res. 2019. Vol. 377(3). P. 397–414. DOI: 10.1007/s00441-019-03031-9
40. Intayung D., Chundang P., Srikachar S., Kovitvadhi A. Ontogenic development of the digestive enzymes and chemical composition of *Hermetia illucens* larvae of different ages // Entomol Exp Appl. 2021. Vol. 169(7). P. 665–73. DOI: 10.1111/eea.13063
41. James M.T.(ed.). Stratiomyidae // Manual of Nearctic Diptera / McAlpine J.F., Pyotrsen B.V., Shewell G.E., Teskey H.J., Vockeroth J.R., Wood D.M. (eds.). Ottawa: Research Branch of Agriculture, Canada; 1981. Chapter 36. P. 497–511.
42. Jayanegara A., Yantina N., Novandri B., Laconi E.B., Nahrowi N., Ridla M. Evaluation of some insects as potential feed ingredients for ruminants: chemical composition, in vitro rumen fermentation and methane emissions // J Indones Trop Anim Agric. 2017. Vol. 42. P. 247–54. DOI: 10.14710/jitaa.42.4.247-254
43. Jeon H., Park S., Choi J., Jeong G., Lee S.-B., Choi Y., et al. The intestinal bacterial community in the food waste-reducing larvae of *Hermetia illucens* // Curr Microbiol. 2011. Vol. 62(5). P. 1390–9. DOI: 10.1007/s00284-011-9874-8
44. Jungreis A.M. Hemolymph as a dynamic tissue // Insect biology in the future / Locke M., Smith D.S. (eds.). Academic Press; 1980. P. 273–294. DOI: 10.1016/B978-0-12-454340-9.50017-3
45. Kabara J.J., Swieczkowski D.M., Conley A.J., Truant J.P. Fatty acids and derivatives as antimicrobial agents // Antimicrob. Agents Chemother. 1972. Vol. 2. P. 23–28. DOI: 10.1128/aac.2.1.23
46. Kanost M.R. Hemolymph // Encyclopedia of insects / Resh V.H., Cardé R.T. (eds.). 2nd ed. Academic Press; 2009. P. 446–449. DOI: 10.1016/B978-0-12-374144-8.00126-0
47. Karasov W.H., Douglas A.E. Comparative digestive physiology // Compr Physiol. 2013. Vol. 3(2). P. 741. DOI: 10.1002/cphy.c110054
48. Kaya C., Generalovic T.N., Ståhls G., Hauser M., Samayoa A.C., Nunes-Silva C.G., et al. Global population genetic structure and demographic trajectories of the black soldier fly, *Hermetia illucens* // BMC Biol. 2021. Vol. 19. 94. DOI: 10.1186/s12915-021-01029-w
49. Kaya C., Generalovic T.N., Ståhls G., Hauser M., Samayoa A.C., Nunes-Silva C.G., et al. Global population genetic structure and demographic trajectories of the black soldier fly, *Hermetia illucens* // BMC Biol. 2021. Vol. 19. 94. DOI: 10.1186/s12915-021-01029-w
50. Kilby B.A. The biochemistry of the insect fat body // Advances in insect physiology / Beament J.W.L., Treherne J.E., Wigglesworth V.B. (eds.). Academic Press; 1963. P. 111–174. DOI: 10.1016/S0065-2806(08)60175-7
51. Kim W., Bae S., Park K., Lee S., Choi Y., Han S., et al. Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) // J Asia Pac Entomol. 2011. Vol. 14(1). P. 11–4. DOI: 10.1016/j.aspen.2010.11.003
52. Kim W.-T., Bae S.-W., Kim A., Park K.-H., Lee S.-B., Choi Y.-C., et al. Characterization of the molecular features and expression patterns of two serine proteases in *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae // BMB Rep. 2011. Vol. 44(6). P. 387–92. DOI: 10.5483/BMBRep.2011.44.6.387
53. Kim W.T., Bae S.-W., Park H.-C., Park K.-H., Lee S.-B., Choi Y.-C., et al. The larval age and mouth morphology of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) // Int J Indust Entomol. 2010. Vol. 21(2). P. 185–7.
54. Klammersteiner T., Walter A., Bogataj T., Heussler C.D., Stres B., Steiner F.M., et al. The core gut microbiome of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae raised on low-bioburden diets // Front Microbiol. 2020. Vol. 11. 993. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00993
55. Komosinska-Vassev K., Olczyk P., Kaźmierczak J., Mencner L., Olczyk K. Bee pollen: chemical composition and therapeutic application // Evid. Based. Complement. Alternat. Med. 2015. 297425.
56. Lalander C., Diener S., Zurbrugg C., Vinnerås B. 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. P. 211–219.

57. Leclercq M. A propos de *Hermetia illucens* (LINNAEUS, 1758) ("soldier fly") (Diptera:Stratiomyidae: Hermetiinae) // Bull Annls Soc r belge Ent. 1997. Vol. 133. P. 269–82.
58. Lee C.-M., Kim S.-Y., Song J., Lee Y.-S., Sim J.-S., Hahn B.-S. Isolation and characterization of a halotolerant and protease-resistant α -galactosidase from the gut metagenome of *Hermetia illucens* // J Biotechnol. 2018. Vol. 279. P. 47–54. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2018.05.003
59. Leni G., Caligiani A., et al. Killing method affects the browning and the quality of the protein fraction of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) prepupae: a metabolomics and proteomic insight // Food Research International. 2019. Vol. 115. January. P. 116-125. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.08.021
60. Lessard B.D., Yeates D.K., Woodley N.E. Revision of the Hermetiinae of Australia (Diptera: Stratiomyidae) // Austral Entomol. 2019. Vol. 58(1). P. 122–36. DOI: 10.1111/aen.12333
61. Li L., Ji H., Zhang B., Tian J., Zhou J., Yu H. Influence of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae oil on growth performance, body composition, tissue fatty acid composition and lipid deposition in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) // Aquaculture. 2016. Vol. 465. P. 43–52. DOI: 10.1186/s40104-018-0310-9
62. Li X., Dong Y., et al. Growth and Fatty Acid Composition of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) Larvae Are Influenced by Dietary Fat Sources and Levels // Animals (Basel). 2022. Vol. 12(4). 486. DOI: 10.3390/ani12040486
63. Liland N.S., Biancarosa I., Araujo P., Biemans D., Bruckner C.G., Waagbø R., et al. Modulation of nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae by feeding seaweed-enriched media // PloS one. 2017. Vol. 12(8). e0183188. DOI: 10.1371/journal.pone.0183188
64. Liu X., Chen X., et al. Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly // PLoS ONE. 2017. August 10. DOI: 10.1371/journal.pone.0182601
65. Mani K., Balakrishnan K., Sanjeev G., et al. Assessment of electron beam irradiation induced proteomic changes and its effect on the development of silkworm, *Bombyx mori* (Bombycidae: Lepidoptera) // J. Basic Appl. Zool. 2016. Vol. 73. P. 32–38. DOI: 10.1016/j.jobaz.2015.12.002
66. Mani K., Vitenberg T., Schweitzer R., et al. Hemolymph metabolism of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae), response to different supplemental fungi // J. Insect Sci. 2024. Vol. 24. 5. DOI: 10.1093/jisesa/ieae050
67. 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 // J Ent Soc Ont. 2015. Vol. 146. P. 51–4.
68. Matsakidou A., Sarivasiliou S.-I., et al. Compositional, volatile, and structural features of *Hermetia illucens* (black soldier fly) flours: The effect of population and life stages // Future Foods. 2024. Vol. 9. DOI: 10.1016/j.fufo.2024.100320
69. Maurer, V., Holinger, M., Amsler, Z., Früh, B., Wohlfahrt, J., Stamer, A., Leiber, F. Replacement of soybean cake by *Hermetia illucens* meal in diets for layers // J. Ins. Food Feed. 2016. Vol. 2. nr 2. P. 83-90. DOI: 10.3920/JIFF2015.0071
70. Meneguz M., Gasco L., Tomberlin J.K. Impact of pH and feeding system on black soldier fly (*Hermetia illucens*, L; Diptera: Stratiomyidae) larval development // PloS one. 2018. Vol. 13(8). e0202591. DOI: 10.1371/journal.pone.0202591
71. Meneguz M., Schiavone A., Gai F., Dama A., Lussiana C., Renna M., et al. Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae // J Sci Food Agric. 2018. Vol. 98(15). P. 5776–84. DOI: 10.1002/jsfa.9127
72. Monisha C., Loganathan M. Impact of drying methods on the physicochemical properties and nutritional composition of defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae flour // Food Processing and Preservation. 2021 December 02. DOI: 10.1111/jfpp.16184
73. Nakamura S., Ichiki R.T., Shimoda M., Morioka S. Small-scale rearing of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing // Appl. Entomol. Zool. 2016. Vol. 51. P. 161–166.
74. Nekrasov R.V., Ivanov G.A., et al. Effect of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) Fat on Health and Productivity Performance of Dairy Cows // Animals. 2022. Vol. 12(16). 2118. DOI: 10.3390/ani12162118
75. Nekrasov R.V., Ivanov G.A., et al. Effect of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) Fat on Health and Productivity Performance of Dairy Cows // Animals. 2022. Vol. 12(16). 2118. DOI: 10.3390/ani12162118

76. Nekrasov R.V., Pravdin I.V., Kravtsova L.Z., Bastrakov I.A., Pashkova L.A., Ushakova N.A. Biochemical Characteristics of Insects *Hermetia illucens* // Chemical and Biochemical Physics. A Systematic Approach to Experiments, Evaluation, and Modeling / Schiraldi D., Zaikov G.E. (eds). Apple Academic Press, 2016. Pp. 287–300.
77. Nguyen T.T.X., Tomberlin J.K., Vanlaerhoven S. Influence of resources on *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larval development // Journal of Medical Entomology. 2013. Vol. 50(4). P. 898–906.
78. Oliveira F.R., Doelle K., Smith R.P. External morphology of *Hermetia illucens* Stratiomyidae: Diptera (L.1758) based on electron microscopy // Annu. Res. Rev. Biol. 2016. Vol. 9. P. 1–10.
79. Oonincx D.G.A.B., van Broekhoven S., van Huis A., van Loon J.J.A. Feed Conversion, Survival and Development, and Composition of Four Insect Species on Diets Composed of Food By-Products // PLoS ONE. 2015. Vol. 10(12). e0144601.
80. Opatovsky I., Vitenberg T., Jonas-Levi A., et al. Does consumption of baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae affect their fatty acid Composition? // J. Insect Sci. 2021. Vol. 21. 5. DOI: 10.1093/jisesa/ieab031
81. Peguero D.A., Gold M., Velasquez L., Niu M., Zurbrugg C., Mathys A. Physical pretreatment of three biowastes to improve black soldier fly larvae bioconversion efficiency // Waste Management. 2024.
82. Pei Y., Zhao S., Chen X., et al. *Bacillus velezensis* EEAM 10B strengthens nutrient metabolic process in black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) via changing gut microbiome and metabolic Pathways // Front. Nutr. 2022. Vol. 9. 880488. DOI: 10.3389/fnut.2022.880488
83. Purkayastha D., Sarkar S. Sustainable waste management using black soldier fly larva: a review // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022.
84. Rehman K.U., Rehman A., Cai M., Zheng L., Xiaopeng X., Somroo A.A., Wang H., Li W., Yu Z., Zhang J. Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 154. P. 366–373.
85. Romano N., Sinha A., Powell A., Fischer H. Mineral composition in black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and resulting frass from fruit and their peels // Journal of Insects as Food and Feed. 2023. Online Publication Date: 17 Jan. DOI: 10.3920/JIFF2022.0019
86. Rozkosný R. A biosystematic study of the European Stratiomyidae (Diptera) // Series Entomologicae. 1983. Vol. 2. P. 172–176.
87. Sajjadian S.M., Hosseinaveh V. Destruction of peritrophic membrane and its effect on biological characteristics and activity of digestive enzymes in larvae of the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) // Eur J Entomol. 2015. Vol. 112(2). P. 245–50. DOI: 10.14411/eje.2015.046
88. Shaphan Y., Tanga C.M., et al. Nutritional composition of black soldier fly larvae feeding on agro-industrial byproducts // Entomologia Experimentalis et Applicata. 2020. Vol. 168(6-7). June. DOI: 10.1111/eea.12940
89. Sheppard D.C., Tomberlin J.K., Joyce J., Kiser B.C., Sumner S.M. Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) // J. Med. Entomol. 2002. Vol. 39. P. 695–698.
90. Shishkov O., Hu M., Johnson C., Hu D.L. Black soldier fly larvae feed by forming a fountain around food // J R Soc Interface. 2019. Vol. 16(151). 20180735. DOI: 10.1098/rsif.2018.0735
91. Shumo M., Osuga I.M. The nutritive value of black soldier fly larvae reared on common organic waste streams in Kenya // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. Article number: 10110. DOI: 10.1038/s41598-019-46603-z
92. Sogari G., Amato M., Biasato I., Chiesa S., Gasco L. The potential role of insects as feed: a multi-perspective review // Animals. 2019. Vol. 9(4). 119.
93. Song J., Kim S.-Y., Kim D.-H., Lee Y.-S., Sim J.-S., Hahn B.-S., et al. Characterization of an inhibitor-resistant endo-1, 4-β-mannanase from the gut microflora metagenome of *Hermetia illucens* // Biotechnol Lett. 2018. Vol. 40(9). P. 1377–87. DOI: 10.1007/s10529-018-2596-2
94. Sprangers T., Ottoboni M., Klootwijk C., Ovyen A., Deboosere S., De Meulenaer B., De Smet S. Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2017. Vol. 97(8). P. 2594–2600.
95. Steele J.E. Glycogen phosphorylase in insects // Insect Biochem. 1982. Vol. 12. P. 131–147. DOI: 10.1016/0020-1790(82)90001-4
96. Surendra K.C., Olivier R. Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming // Renewable Energy. 2016. Vol. 98. December. P. 197–202. DOI: 10.1016/j.renene.2016.03.022

97. Tomberlin J.K., Adler P.H., Myers H.M. Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature // Environ. Entomol. 2009. Vol. 38. P. 930–934.
98. 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.
99. Van der Hoeven-Hangoor E., Van Der Vossen J.M.B.M., Schuren F.H.J., Verstegen M.W.A., De Oliveira J.E., Montijn R.C., Hendriks W.H. Ileal microbiota composition of broilers fed various commercial diet compositions // Poult. Sci. 2013. Vol. 92. P. 2713–2723. DOI: 10.3382/ps.2013-03017
100. Van Gerwe T., Bouma A., Klinkenberg D., Wagenaar J.A., Jacobs-Reitsma W.F., Stegeman A. Medium chain fatty acid feed supplementation reduces the probability of *Campylobacter jejuni* colonization in broilers // Vet. Microbiol. 2010. Vol. 143. P. 314–318. DOI: 10.1016/j.vetmic.2009.11.029
101. Van Immerseel F., Russel J.B., Flythe M.D., Gantois I., Timbermont L., Pasmans F., Haesebrouck F., Ducatelle R. The use of organic acids to combat *Salmonella* in poultry: A mechanistic explanation of the efficacy // Avian Pathol. 2006. Vol. 35. P. 182–188. DOI: 10.1080/03079450600711045
102. Van Moll L., De Smet J., Paas A., et al. In vitro evaluation of antimicrobial peptides from the black soldier fly (*Hermetia Illucens*) against a selection of human pathogens // Microbiol. Spectr. 2022. Vol. 10. e01664-21. DOI: 10.1128/spectrum.01664-21
103. Vogel H., Müller A., Heckel D.G., et al. Nutritional immunology: diversification and diet-dependent expression of antimicrobial peptides in the black soldier fly *Hermetia illucens* // Dev. Comp. Immunol. 2018. Vol. 78. P. 141–148. DOI: 10.1016/j.dci.2017.09.008
104. Watanabe H., Tokuda G. Cellulolytic systems in insects // Annu Rev Entomol. 2010. Vol. 55. P. 609–32. DOI: 10.1146/annurev-ento-112408-085319.
105. Woodley N.E. A World Catalog of the Stratiomyidae (Insecta: Diptera) // Int JNorth Am Dipterists' Soc. 2001. Vol. 11. P. 1–476.
106. Zandi-Sohani N., Tomberlin J.K. Comparison of Growth and Composition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) Larvae Reared on Sugarcane By-Products and Other Substrates // Insects. 2024. Vol. 15(10). 771.
107. Zeiger K., Popp J., Becker A., Hankel J., Visscher C., Klein G., Meemken D. Lauric acid as feed additive—An approach to reducing *Campylobacter* spp. in broiler meat // PLoS ONE. 2017. Vol. 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0175693
108. Zeitz J., Fennhoff O.J., Kluge H., Stangl G.I., Eder K. Effects of dietary fats rich in lauric and myristic acid on performance, intestinal morphology, gut microbes, and meat quality in broilers // Poult. Sci. 2015. Vol. 94. P. 2404–2413. DOI: 10.3382/ps/pev191
109. Zhang Q.-H., Puniamoorthy N. Impact of Rearing Substrates on Black Soldier Fly Growth and Fertility: A Semi-Industrial Scale Study to Optimize Egg Collection. 2025.
110. Антонов А.М., Лутвиновас Е., Иванов Г.А., Пастухова Н.О. Адаптация и перспективы разведения мухи Чёрная львинка (*Hermetia illucens*) в циркумполярном регионе // Принципы экологии. 2017. № 3. С. 4–19. DOI: 10.15393/j1.art.2017.6302
111. Некрасов Р.В., Бутенко А.И., Туаева Е.В., Чабаев М.Г., Боголюбова Н.В., Рыков Р.А., Колесник Н.С., Остренко К.С. Зерновые отходы как перспективный субстрат для выращивания личинок *Hermetia illucens* L. (Diptera, Stratiomyidae) // Сельскохозяйственная биология. 2025. Vol. 60(2). P. 361–381.
112. Некрасов Р.В., Чабаев М.Г., Зеленченкова А.А., Бастраков А.И., Ушакова Н.А. Питательные свойства личинок *Hermetia illucens* L. — нового кормового продукта для молодняка свиней (*Sus scrofa domestica* Erxleben) // Сельскохозяйственная биология. 2019. Vol. 54(2). P. 316–325.
113. Романенко Е.А. Обезжиренная мука из личинок мух чёрная львинка (*Hermetia illucens*) в комбикормах для племенных кур кросса «Хайсекс коричневый» // Птицеводство. 2023. №4. С. 34–38. DOI: 10.33845/0033-3239-2023-72-4-34-38
114. Тышко Н.В., Жминченко В.М., Никитин Н.С., Требух М.Д., Шестакова С.И., Пашорина В.А., Садыкова Е.О. Комплексные исследования биологической ценности белка личинок *Hermetia illucens* // Проблемы питания. 2021. Vol. 90. P. 49–58.

References (for publications in Russian)

1. Antonov A.M., Lutovinovas E., Ivanov G.A., et al. [Adaptation and breeding prospects of the black lion fly (*Hermetia illucens*) in the circumpolar region]. *Principy ekologii* (Principles of ecology). 2017. 3: 4–19. DOI: 10.15393/j1.art.2017.6302
2. Nekrasov R.V., Butenko A.I., Tuaeva E.V., Chabaev M.G., Bogolyubova N.V., Rykov R.A., Kolesnik N.S., Ostrenko K.S. [Grain waste as a promising substrate for rearing *Hermetia illucens* L. (Diptera, Stratiomyidae) larvae]. *Selskokhozyaistvennaya biologiya* (Agricultural Biology). 2025. Vol. 60(2). P. 361–381.
3. Nekrasov R.V., Chabaev M.G., Zelenchenkova A.A., Bastrakov A.I., Ushakova N.A. [Nutritional properties of *Hermetia illucens* L. larvae — a new feed product for young pigs (*Sus scrofa domestica* Erxleben)]. *Selskokhozyaistvennaya biologiya* (Agricultural Biology). 2019. Vol. 54(2). P. 316–325.
4. Romanenko E.A. [Defatted flour from black lion fly (*Hermetia illucens*) larvae in compound feeds for breeding hens of the cross "Highsex Brown"]. *Ptitsevodstvo* (Poultry Farming). 2023. No. 4. P. 34–38. DOI: 10.33845/0033-3239-2023-72-4-34-38
5. Tyshko N.V., Zhminchenko V.M., Nikitin N.S., Trebukh M.D., Shestakova S.I., Pashorina V.A., Sadykova E.O. [Comprehensive studies of the biological value of *Hermetia illucens* larvae protein]. *Problemy pitaniya* (Problems of Nutrition). 2021. Vol. 90. P. 49–58.

UDC 636.087.69

Fundamental and practical aspects of the cultivation of black soldier fly larvae for the production of feed products with high nutritional value: review

¹Nekrasov R.V., ²Butenko A.I., ²Pishchulin I.N., ²Studenkov A.N.

¹VNIIFBiP - branch of Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Borovsk, Kaluga Region, ²Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry, Podolsk -Dubrovitsy, Moscow Region

ABSTRACT. In the context of a global deficit in traditional protein resources (fishmeal and soybean meal) and the urgent need for organic waste recycling, the development of insect-based technologies has acquired strategic importance. The Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) is recognized as the most efficient biotechnological agent for converting biomass into high-quality feed-grade protein and lipids. Expanding the evidence base regarding the applicability of larval derivatives in the diets of productive livestock is a priority task for modern animal husbandry in the Russian Federation. This article provides a comprehensive review of the fundamental and applied aspects of rearing *Hermetia illucens*. The first section examines the physiological characteristics of the insect: its short life cycle (approximately 41 days), the unique morphology of the polyphagous digestive tract, and the capacity for active substrate alkalization. The mechanisms of midgut enzymatic systems and the role of the microbiome in adapting larvae to various organic wastes - ranging from food residues to cattle manure - are described. The second part analyzes the efficiency of bioconversion. It is established that the chemical composition of the final biomass is directly programmed by the substrate formulation: carbohydrate-rich diets promote lipid accumulation (up to 57% fat), whereas protein-rich substrates stimulate protein synthesis (up to 62% in defatted flour). Particular attention is paid to the mineral profile of the larvae, which exhibit an exceptionally high calcium concentration (up to 8–9%) and the ability to accumulate trace elements from their environment. Technological parameters for industrial production are considered, including optimal substrate moisture (60–75%), stocking density, and the influence of mechanical pretreatment on insect metabolic rates. The third section focuses on a detailed analysis of the product's chemical composition. The amino acid profile is characterized by high levels of lysine, leucine, and valine. The lipid fraction is distinguished by the predominance of saturated medium-chain fatty acids, specifically lauric acid (up to 59%), which possesses pronounced antibacterial properties.

Consequently, *Hermetia illucens* L. represent a versatile raw material for creating environmentally friendly, high-protein, and energy-dense feed additives. The biomass features a stable amino acid profile, while its lipid composition can be purposefully modified through dietary manipulation. Processing products derived from *Hermetia illucens* are capable of effectively replacing expensive components in compound feeds, thereby reducing the import dependency of the domestic feed industry.

Keywords: larvae, insectoid technologies, nutrition, waste, feed additives, fatty acids, amino acids.

Problemy biologii productivnykh zhivotnykh – Problems of Productive Animal Biology. 2026. 3: 5-26

Поступило в редакцию: 12.07.2026

Получено после доработки: 06.09.2026

Сведения об авторах:

Некрасов Роман Владимирович, д.с.-х.н., проф. РАН, директор филиала, тел. +7(905)7004427; nek_roman@mail.ru;

Бутенко Алексей Иванович, специалист, hugo_st@inbox.ru;

Пищулин Иван Николаевич, специалист, pischulin8@mail.ru;

Студенков Артём Никитич, специалист, artem1098st@mail.ru