

КОРМОПРОИЗВОДСТВО. КОРМЛЕНИЕ/ FODDER PRODUCTION. FEEDING

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.28-42>

УДК 636.087.69



Результаты экспериментальных исследований экструдирования кормов, содержащих зерно пшеницы и биомассу личинок черной львинки

© 2020. В. И. Пахомов¹, С. В. Брагинец¹, О. Н. Бахчевников¹ ✉,
А. С. Алферов¹, А. И. Рухляда¹, А. С. Бабаджанян²

¹ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация,

²ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Экспериментальные исследования выполнены в 2019 г. в Ростовской области. Экструдировали 3 варианта смеси измельченного зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки с содержанием животного сырья 10, 12,5 и 15 % по массе при различной температуре. Определяли содержание аминокислот в сырье и готовом экструдате. Установлено, что кормовая смесь из измельченного зерна и биомассы личинок черной львинки может быть успешно экструдирована при температуре 121-135 °С. При увеличении температуры экструдирования в диапазоне 115-140 °С содержание аминокислот в готовом экструдате снижается. Изменение содержания личинок насекомых в кормовой смеси не оказывает влияния на характер зависимости содержания аминокислот в экструдате от температуры экструдирования и протекание процесса. Установлено, что содержание аминокислот в экструдированном корме при увеличении температуры уменьшается с возрастающей скоростью независимо от содержания биомассы насекомых. Определен рациональный диапазон температуры экструдирования кормовой смеси из зерна пшеницы и личинок насекомых – 121-127 °С, обеспечивающий снижение содержания незаменимых аминокислот в экструдате не более чем на 30 %. Экструдированный корм, включающий 15% биомассы личинок насекомых, содержит 9,6±0,13 % аминокислот, в том числе 4,38±2,01 % незаменимых аминокислот. Экструдирование биомассы личинок насекомых в смеси с зерном зерновых культур является перспективным направлением совершенствования производства кормов для рыб и сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова: корма, корм из насекомых, экструдат, личинки насекомых, протеин, аминокислоты

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ «АНЦ «Донской» (тема № 0706-2019-0006).

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пахомов В. И., Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Алферов А. С., Рухляда А. И., Бабаджанян А. С. Результаты экспериментальных исследований экструдирования кормов, содержащих зерно пшеницы и биомассу личинок черной львинки. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(1):28-42. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.28-42>

Поступила: 10.02.2020

Принята к публикации: 27.02.2020

Опубликована онлайн: 28.02.2020

The results of experimental studies of extrusion of feed containing wheat grain and black soldier fly larvae biomass

© 2020. Viktor I. Pakhomov¹, Sergey V. Braginetz¹, Oleg N. Bakhchevnikov¹ ✉,
Aleksander S. Alferov¹, Artem I. Rukhlyada¹, Arkady S. Babajanyan²

¹Agricultural Research Centre Donskoy, Zernograd, Russian Federation

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

The experimental studies were carried out in the Rostov region of Russia in 2019. Three variants of grinded wheat grain mixed with biomass of black soldier fly larvae with raw animal material content of 10, 12.5 and 15 % by mass were extruded at varying temperature. The content of amino acids in raw material and finished extrudate was determined. It has been established that the feed mixture containing grinded wheat grain and biomass of black soldier fly larvae can be successfully extruded at the temperature of 121-135 °C. As the extrusion temperature rises in the range of 115-140 °C, the content of amino acids in a finished extrudate decreases. Change in larvae content in the feed mixture does not affect the nature of the correlation between the amino acids content in the extrudate and the extrusion temperature and process behavior. It has been found that with increasing temperature the amino acids content in the extruded feed decreases with an accelerated velocity irrespective of the insect biomass content. The rational temperature range for extrusion of feed mixture containing grinded wheat grain and larvae biomass was determined within 121-127 °C. This range provides no more than 30 % decrease in indispensable amino acids content in the extrudate. The extruded feed containing 15% of insect larvae biomass contains

9.6±0.13 % of amino acids, including 4.38±2.01 % of indispensable amino acids. Extrusion of larvae biomass mixed with grain of cereal crops is considered to be a promising direction for improving production of feed for fish and farm animals.

Keywords: feed, insect as feed, extrudate, insect larvae, protein, amino acids

Acknowledgement: the research was carried out within the state assignment of the Agricultural Research Centre Donskoy (theme No. 0706-2019-0006).

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Pakhomov V. I., Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Alferov A. S., Rukhlyada A. I., Babajanyan A. S. The results of experimental studies of extrusion of feed containing wheat grain and black soldier fly larvae biomass. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(1):28-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.28-42>

Received: 10.02.2020

Accepted for publication: 27.02.2020

Published online: 28.02.2020

В настоящее время актуально повышение питательной ценности кормов для сельскохозяйственных животных и аквакультуры, для чего необходимо обеспечить высокое содержание в них белка [1]. Особенно важно наличие в кормах компонентов животного происхождения с высоким содержанием протеина для обеспечения потребности в незаменимых аминокислотах [2]. Но в последние годы происходит уменьшение объемов производства сырья животного происхождения, такого как рыбная, крилевая и мясокостная мука, вызывающее повышение его стоимости [3]. Это сопровождается ухудшением его качества и фальсификацией [4].

Во всем мире ведутся исследования по поиску новых недорогих кормовых компонентов с высоким содержанием белка, в том числе незаменимых аминокислот [5]. Одним из наиболее перспективных видов кормового сырья по экономическим критериям и содержанию протеина являются личинки синантропных мух [6], в частности личинки мухи черная львинка (*Hermetia illucens* L.) [7].

Личинок черной львинки выращивают на субстрате из растительного сырья или пищевых отходов, причем его биоконверсия достигает 77 %, что обуславливает низкую стоимость готовой продукции [8]. Достоинством личинок, как компонента кормов, является высокое содержание в них протеина – 35-48 %, при этом на долю переваримого протеина приходится 85-95 % [9]. Содержание жира в личинках также высокое и составляет 20-45 % [10].

Личинки черной львинки имеют высокую влажность – 60-65 % [9], поэтому для использования в составе кормов их необходимо предварительно высушивать [11].

Для включения биомассы личинок черной львинки в состав комбикормов ее необходимо предварительно обработать. Наиболее простым способом обработки является конвективная сушка личинок при температуре 70-80 °С и последующее измельчение [9, 11]. Недостатком этого способа является разруше-

ние части белков при длительном нагреве и наличие в корме непереваримого хитина.

Наибольшее распространение получили способы разделения биомассы личинок насекомых на фракции механическими (отжим жира, сепарация) и химическими (экстракция) методами, результатом применения которых является выделение из нее белков, жиров и хитина [12]. Выделенный белок подвергают измельчению и конвективной сушке, получая высушенную массу, представляющую собой аналог рыбной муки [13]. Экспериментальные исследования показали, что протеинсодержащая мука из личинок насекомых может служить адекватной заменой рыбной муке в составе комбикормов, не уступая ей по содержанию аминокислот [9, 14]. Выделенный из личинок насекомых жир также включают в рационы животных [15].

Недостатком этого способа переработки насекомых является его большая сложность и обусловленная этим высокая стоимость. Кроме того, разделение содержащихся в сырье белков и жиров не всегда оправдано, так как животным необходимы оба этих вида питательных веществ, что требует совместного введения в состав корма ранее разделенных компонентов.

Сложность получения протеиновой муки из личинок черной львинки обуславливает ее высокую себестоимость. В результате создается парадоксальная ситуация, когда недорогое исходное сырье (личинки насекомых) доходит до потребителя в форме дорогой протеинсодержащей муки. Сходная ситуация создается и при производстве рыбной муки из недорогой мелкой рыбы [16]. Это значительно снижает эффективность использования в составе кормов биомассы насекомых. Поэтому необходимо разработать недорогой способ подготовки и введения биомассы личинок в состав кормов.

При производстве комбикормов для сельскохозяйственных животных часть компонентов, а для хищных рыб – все компоненты в составе корма подвергают экструдированию для улучшения структуры и повышения усвоя-

емости питательных веществ [17]. Сравнительные экспериментальные исследования по экструдированию комбикормов для рыб, содержащих, соответственно, рыбную муку и протеиновую муку из черной львинки, показали, что эти виды сырья сопоставимы по содержанию аминокислот, в том числе незаменимых, и питательной ценности [18, 19].

Использование сырья из насекомых в комбикорме в форме протеиновой муки требует его предварительной дорогостоящей обработки [14]. Наилучшим вариантом по критерию себестоимости является введение личинок в состав корма без их предварительной обработки либо с минимальной обработкой.

Основным компонентом кормов для свиней, птицы и растительноядных рыб является фуражное зерно, в частности зерно пшеницы, бедное белком. Добавление к нему биомассы личинок позволит увеличить содержание протеина в готовом корме [9].

Авторами статьи предложен способ введения личинок насекомых в состав кормов, заключающийся в совместном экструдировании их биомассы с зерновыми компонентами корма (пшеница). Экструдирование растительного и животного сырья по причине большой энергоемкости этого процесса является дорогостоящей операцией. Но если технологическая схема производства комбикорма предусматривает экструдирование всех или части его компонентов, то добавление к ним биомассы личинок в количестве 10-15 % не приведет к ощутимому увеличению себестоимости готового корма, а себестоимость подготовки самой биомассы будет невелика.

Для экструдирования зерна его необходимо предварительно увлажнить, что удорожает приготовление кормов [20]. Альтернативой увлажнению является добавление к зерну растительного или животного сырья с высокой влажностью и их совместное экструдирование, что снижает энергоемкость процесса [20]. Биомасса личинок черной львинки имеет влажность 60-65 %, что позволяет снизить себестоимость приготовления корма за счет отказа от увлажнения сырья. Наличие жиров в личинках также может оказать положительное влияние на процесс экструдирования зерновых компонентов кормовой смеси, в частности снизить его удельную энергоемкость [21].

Перед экструдированием рационально отделить от биомассы личинок непереваримый хитин. Для этого возможно применить простой способ измельчения и последующего

механического разделения биомассы личинок [13, 22]. В результате его применения биомасса разделяется на две фракции – фракцию хитинсодержащей кутикулы и содержащую белки и жиры биомассу внутренностей личинок [22], которая и подвергается экструдированию.

Но существует потенциальное препятствие для производства кормов методом экструдирования смеси растительного и животного сырья. Согласно литературным источникам, в смесях с высоким содержанием углеводов и белков при значительном нагреве происходит реакция мелаидинообразования (реакция Майяра) [23, 24], в ходе которой происходит взаимодействие аминокислот с сахарами. В результате в подвергнутом тепловой обработке продукте снижается содержание аминокислот, происходит снижение усвояемости белка. Особенно активно в реакции Майяра участвует лизин [24].

Установлено, что высокая температура, создаваемая в процессе экструдирования, способствует протеканию реакции Майяра в сырье с большим содержанием углеводов [23]. В частности, при экструдировании смеси пшеницы и сои при температуре 170 °C снижение содержания лизина составило 40 % [25].

Согласно экспериментальным данным, потери лизина и других аминокислот при тепловой обработке увеличиваются с повышением температуры и уменьшаются при увеличении влажности сырья [23]. Таким образом, при экструдировании смеси из зерна пшеницы, богатого углеводами, и личинок насекомых, богатых белком, возможно протекание реакции Майяра и, как следствие, снижение содержания аминокислот в готовом корме. Однако высокая влажность биомассы личинок может способствовать минимизации потерь аминокислот.

Следует отметить, что в ходе известных исследований экструдирования кормов, содержащих зерно и личинки насекомых, последние вводились в состав корма в форме обезжиренной и обезвоженной протеинсодержащей муки [17, 18, 19] либо в форме обезвоженной и измельченной массы [26]. Исследований же по экструдированию личинок без их предварительной обработки или с минимальной обработкой (выделение хитина) ранее не проводили.

Цель исследований – экспериментальная проверка возможности экструдирования кормовых смесей, содержащих зерно пшеницы и личинки черной львинки, и определе-

ние рациональных параметров процесса экструдирования, обеспечивающих сохранность протеина в экструдированном корме.

Материал и методы. Экспериментальные исследования проведены в 2019 г. в Ростовской области. В ходе исследований готовили экструдированный корм для свиней. В качестве сырья для корма использовали личинки мухи черная львинка и зерно озимой пшеницы.

Личинки мухи черная львинка (*Hermetia illucens* L.) были выращены в «Исследовательском центре кормов для аквакультуры» Донского государственного технического университета (ДГТУ) в инсектарии на субстрате из смеси пищевых отходов и овсяных хлопьев

[27]. Для приготовления корма использовали личинки в стадии предкуколки [28].

Подготовка личинок включала их деактивацию понижением температуры воздуха, мойку, отделение от субстрата, измельчение в шнековой мясорубке (рис. 1). Выделение хитинсодержащей оболочки произведено в шнековой соковыжималке путем продавливания массы личинок через решетку с диаметром отверстий 1,5 мм [22]. В результате была получена однородная биомасса внутренностей личинок, богатая протеином и жиром ($36 \pm 0,4$ % протеина, $26 \pm 0,3$ % жира в сухом веществе), которую использовали для приготовления кормовой смеси. Влажность биомассы составила $60 \pm 0,6$ %.

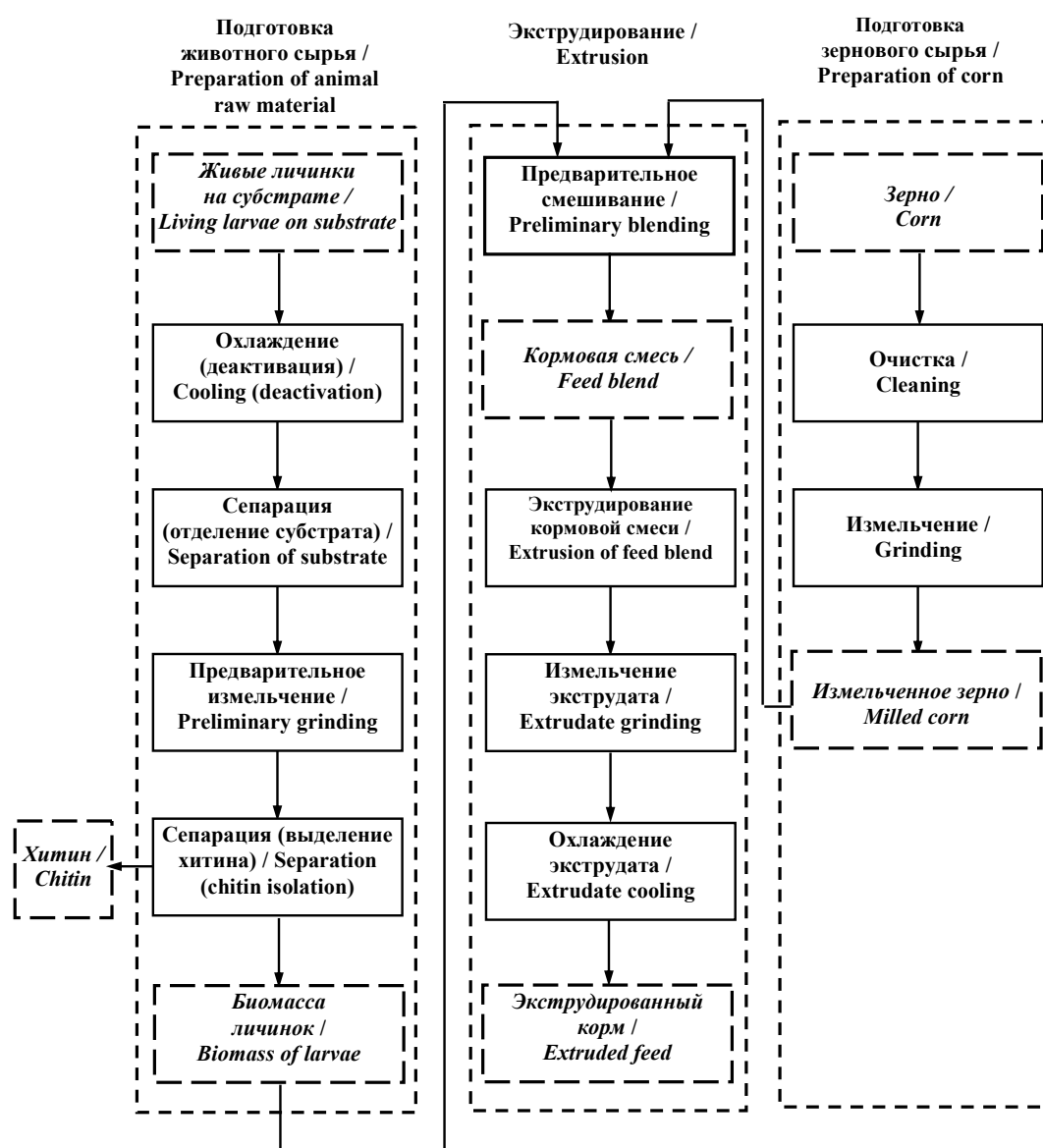


Рис. 1. Технологическая схема производства экструдированного корма из биомассы личинок черной львинки и зерна пшеницы

Fig. 1. Manufacturing scheme for production of extruded feed containing black soldierfly larvae and wheat grain

Использовали зерно озимой пшеницы урожая 2019 г., выращенное в «АНЦ «Донской». Зерно предварительно очистили от примесей и измельчили на молотковой дробилке с диаметром отверстий решета 3 мм. Влажность зерна пшеницы составляла $13,8 \pm 0,21$ %.

Для приготовления корма применяли малый одношнековый экструдер ЭК-80, разработанный в «АНЦ «Донской». Его максимальная производительность составляет 80 кг/ч, мощность электродвигателя – 7,5 кВт. Частота вращения шнека – $220\text{--}308\text{ с}^{-1}$. Загрузочный бункер экструдера был оснащен объемным дозатором для равномерной подачи сырья. Отношение длины шнека к диаметру составляло $L/D = 6:1$ при $D = 55$ мм, диаметр выходного отверстия фильеры – 10 мм.

Измельченное зерно пшеницы и биомассу личинок смешивали в бытовом миксере. Каждый вариант кормовой смеси приготавливали в количестве 200 г. Смесь загружали в ЭК-80 и экструдировали при заданном значении частоты вращения шнека. На выходе из матрицы жгут экструдата измельчали вращающимся ножом, в результате чего получали гранулы длиной 100 ± 5 мм. Гранулы охлаждали до комнатной температуры путем естественного остывания, затем упаковывали в полиэтиленовые пакеты и отправляли на анализ.

Экструдировали 3 варианта смеси кормового сырья со следующим составом и соотношением компонентов (по массе): I – Биомасса личинок черной львинки + зерно пшеницы в соотношении 10:90. II – Биомасса личинок + зерно пшеницы в соотношении 12,5:87,5. III – Биомасса личинок + зерно пшеницы в соотношении 15:85. Для сравнения также экструдировали корм, содержащий только измельченное зерно пшеницы (контрольный образец).

Частоту вращения шнека изменяли с помощью частотного преобразователя в диапазоне $220\text{--}308\text{ с}^{-1}$. Увеличение частоты вращения шнека экструдера приводило к повышению температуры экструдирования. Значение частоты вращения шнека 220 с^{-1} соответствует температуре экструдата $115 \pm 0,5$ °C, а 308 с^{-1} – $140 \pm 0,5$ °C. Температуру экструдата измеряли на выходе из фильеры матрицы экструдера термопарой.

Опыт по экструдированию каждого варианта кормовой смеси при определенной частоте вращения шнека экструдера производили в трех повторностях. Результаты измерений представлены в виде: среднее значение

\pm среднее квадратичное отклонение. Достоверность различий средних определяли методом однофакторного дисперсионного анализа с применением апостериорного анализа по критерию Тьюки при $p < 0,05$.

Пробы кормовых смесей и экструдатов отбирали согласно ГОСТ ISO 6497-2014 и готовили к анализу по ГОСТ ISO 6498-2014. Полученные образцы кормовых смесей и готовых экструдатов подвергали химическому анализу по стандартным методикам, определяя общее содержание протеина и жиров, а также влажность. Диаметр гранул экструдата для определения его индекса расширения измеряли штангенциркулем.

Критериями возможности экструдирования кормовой смеси определенного состава и удовлетворительного протекания процесса служили отсутствие заклинивания шнека экструдера, подгорания продукта, снижения производительности экструдера, а также равномерное прохождение сырья через экструдер, получение экструдата хорошего качества. Качество экструдата оценивали органолептическим методом. Экструдат хорошего качества должен иметь плотную пористую однородную структуру, равномерную окраску и приятный запах, его гранулы должны иметь достаточную прочность [20, 26].

Содержание в кормовых смесях и экструдатах различных аминокислот определяли методом капиллярного электрофореза [29] согласно ГОСТ Р 55569-2013. Исследование образцов проводили в лаборатории «Биохимический и спектральный анализ пищевых продуктов» ДГТУ с помощью прибора СКЭ «Капель-104Т».

Метод капиллярного электрофореза состоит в разложении проб корма кислотным гидролизом, вызывающим переход аминокислот в свободные формы, получении ФТК-производных и их электрофоретическом разделении [29]. Количественное определение содержания аминокислот производили путем анализа электрофореграмм. Определяли суммарное содержание аспарагиновой кислоты и аспарагина, глутаминовой кислоты и глутамина, лейцина и изолейцина без их разделения.

В результате обработки результатов анализа определяли количественное содержание в пробе каждой из следующих аминокислот: аланин, аргинин, аспарагин, валин, гистидин, глицин, глутамин, лейцин, лизин, метионин, пролин, серин, тирозин, треонин, триптофан, фенилаланин, цистин. На основе полученных

данных определяли массовую долю каждой аминокислоты в исследуемом образце корма, выраженную в процентах. Полученные значения суммировали, определяя общее содержание аминокислот в корме и отдельно суммарное содержание незаменимых аминокислот (аргинин, валин, гистидин, лейцин, лизин, метионин, треонин, триптофан, фенилаланин).

При обработке результатов экспериментов оценивали влияние температуры экструдирования и содержания биомассы личинок в кормовой смеси на содержание аминокислот в готовом экструдате. В качестве основного показателя качества экструдированного корма использовали общее содержание аминокислот в экструдате и содержание в нем незаменимых аминокислот. В качестве вспомогательных показателей качества экструдата использовали его влажность и индекс расширения.

В данном исследовании температуру экструдирования кормовой смеси оценивали путем измерения температуры экструдата при его выходе из фильеры, так как ее определение не вызывает значительных трудностей. Температура готового экструдата ниже, чем температура в рабочей камере экструдера, но находится от нее в прямой зависимости.

Для оценки влияния температуры на процесс экструдирования кормовой смеси на основе экспериментальных данных вычисляли мгновенную скорость изменения содержания аминокислот, которая показывает, на сколько процентов изменяется содержание аминокислот в экструдате при изменении температуры экструдирования на один градус ($^{\circ}\text{C}$).

Результаты и их обсуждение. Содержание аминокислот в исходной кормовой смеси и ее влажность приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание аминокислот и влажность кормовой смеси из зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки

Table 1 – Amino acids and moisture content in the feed mixture containing black soldier fly larvae and wheat grain

Вариант кормовой смеси / Variant of feed mixture	Общее содержание аминокислот, % / Amino acids content, %	Содержание незамени- мых аминокислот, % / Indispensable amino acids content, %	Влаж- ность, % / Moisture content, %
I – Биомасса личинок 10 % + зерно пшеницы 90 %) / I – Larvae biomass 10 % + wheat grain 90 %)	13,25±0,12	5,05±0,08	18,6±0,18
II – Биомасса личинок 12,5 % + зерно пшеницы 87,5 %) / II – Larvae biomass 12.5 % + wheat grain 87.5 %)	13,71±0,15	5,28±0,09	19,7±0,2
III – Биомасса личинок 15 % + зерно пшеницы 85 %) / III (larvae biomass 15 % + wheat grain 85 %)	14,12±0,13	5,63±0,07	20,9±0,18
Контрольный образец (пшеница 100 %) / Control sample (wheat grain 100 %)	11,81±0,13	3,93±0,08	13,8±0,21

Введение в состав корма биомассы личинок (10-15 %) увеличивало общее содержание аминокислот на 1,44-2,31 %, а незаменимых аминокислот – на 1,12-1,7 % по сравнению с зерном пшеницы (до тепловой обработки). Но при этом влажность кормовой смеси увеличивалась с 13,8 до 18,6-20,9 %.

В результате экспериментов установлено, что кормовая смесь, состоящая из зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки, может быть экструдирована в одношнековом экструдере.

Процесс экструдирования кормовой смеси протекает удовлетворительно при температуре 121-135 $^{\circ}\text{C}$. При температуре менее

121 $^{\circ}\text{C}$ процесс протекает неэффективно, экструдат получается неудовлетворительного качества с резко неоднородной структурой, рыхлый и непрочный. При температуре экструдирования более 135 $^{\circ}\text{C}$ происходит подгорание экструдата, сопровождающееся, как будет показано далее, значительным снижением содержания протеина.

В результате экструдирования смеси зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки при температуре 121-135 $^{\circ}\text{C}$ получен экструдированный корм хорошего качества. Готовый экструдат имел однородную пористую структуру, был плотным и прочным. Экструдат, содержащий биомассу личинок, имел более темный

цвет, чем экструдат только из зерна пшеницы. На рисунке 2 представлены образцы экструдата из зерна пшеницы и биомассы черной

львинки (вариант II: биомасса личинок 12,5 % + зерно пшеницы 87,5 %), полученные при различной температуре.



Рис. 2. Образцы экструдата из зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки (вариант II: биомасса личинок 12,5 % + зерно пшеницы 87,5 %), полученный при температуре: 1, 2 – 115 °С; 3, 4 – 118 °С; 5, 6 – 121 °С; 7, 8 – 124 °С; 9, 10 – 127 °С; 11, 12 – 130 °С; 13, 14 – 132 °С; 15, 16 – 135 °С; 17, 18 – 138 °С; 19, 20 – экструдат только из пшеницы, полученный при температуре 124°С (контрольный образец)

Fig. 2. Samples of the extrudate containing black soldier fly larvae biomass and wheat grain (Variant II: larvae biomass 12.5 % + wheat grain 87.5 %) obtained at the temperature: 1, 2 – 115 °C; 3, 4 – 118 °C; 5, 6 – 121 °C; 7, 8 – 124 °C; 9, 10 – 127 °C; 11, 12 – 130 °C; 13, 14 – 132 °C; 15, 16 – 135 °C; 17, 18 – 138 °C; 19, 20 – extrudate containing only wheat grain obtained at the temperature of 124 °C (control sample)

Влажность готового экструдированного корма составила 9,3-11,8 %, в результате чего отсутствовала необходимость в его сушке (табл. 2). Увеличение содержания биомассы личинок в кормовой смеси приводило к увеличению влажности готового экструдата. Диаметр жгута экструдата составил 14,1-16,2 мм. Индекс расширения экструдата равен 1,41-1,62, индекс расширения экструдата только из пшеницы – 1,79. Низкая величина индекса расширения экструдата обусловлена добавлением в кормовую смесь личинок черной львинки – сырья с высоким содержанием протеина и жиров. При этом увеличение содержания биомассы личинок в кормовой смеси и, соответственно, содержания жира и протеина приводило к снижению индекса расширения готового экструдата.

Не выявлено существенного влияния увеличения влажности кормовой смеси, происходящего при повышении содержания био-

массы личинок, на сохранность аминокислот в процессе экструдирования ($p > 0,05$). Очевидно, объясняется это тем, что при возрастании содержания биомассы с 10 до 15 % общая влажность кормовой смеси увеличивается лишь на 2,3 %, что не оказывает существенного влияния на процесс экструдирования.

Изменение температуры экструдирования не оказало значительного влияния на содержание жиров в готовом экструдате, которое практически не изменилось по сравнению с содержанием в исходной кормовой смеси.

Установлено, что добавление к зерну пшеницы биомассы личинок черной львинки в количестве от 10 до 15 % по массе (при температуре 124 °С) увеличивает общее содержание аминокислот в экструдированном корме от 68 до 105 % по сравнению с экструдатом только из зерна пшеницы (табл. 2). При этом содержание незаменимых аминокислот в экструдате увеличивается в пределах от 112 до 165 %.

Таблица 2 – Показатели качества экструдированного корма из зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки (произведен при температуре 124 °C)

Table 2 – Quality parameters of the extruded feed containing black soldier fly larvae biomass and wheat grain (produced at the temperature of 124 °C)

<i>Вариант кормовой смеси / Variant of feed mixture</i>	<i>Общее содержание аминокислот, % / Amino acids content, %</i>	<i>Содержание незаменимых аминокислот, % / Indispensable amino acids content, %</i>	<i>Влажность, % / Moisture content, %</i>	<i>Индекс расширения / Expansion index</i>
I – Биомасса личинок 10 % + зерно пшеницы 90 %) / I – Larvae biomass 10 % + wheat grain 90 %)	7,85±0,13	3,51±0,09	9,3±0,19	1,62±0,2
II – Биомасса личинок 12,5 % + зерно пшеницы 87,5 %) / II – Larvae biomass 12.5 % + wheat grain 87.5 %)	8,55±0,14	3,89±0,09	10,4±0,18	1,53±0,24
III – Биомасса личинок 15 % + зерно пшеницы 85 %) / III – (larvae biomass 15 % + wheat grain 85 %)	9,6±0,13	4,38±0,1	11,8±0,21	1,41±0,19
Контрольный образец (пшеница 100 %) / Control sample (wheat grain 100%)	4,68±0,16	1,65±0,11	8,2±0,23	1,79±0,22

На рисунках 3 и 4 показаны графики, иллюстрирующие зависимость содержания аминокислот в экструдированном корме от температуры экструдирования (температуры готового экструдата). Установлено, что при увеличении температуры экструдирования в диапазоне 115-140 °C содержание аминокислот в готовом экструдате из зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки снижается. Влияние уровней варьирования фактора на измеряемый параметр достоверно различимо при $p < 0,05$.

Полученные графики показывают, что изменение содержания биомассы личинок в кормовой смеси с 10 до 15 % практически не оказывает влияния на характер графической зависимости содержания аминокислот в экструдате от температуры экструдирования. В результате анализа результатов экспериментов не выявлено значительных различий между характером изменения общего содержания аминокислот (рис. 3) и содержания незаменимых аминокислот (рис. 4) в экструдате при увеличении температуры экструдирования ($p < 0,05$).

Анализ графиков на рисунках 3 и 4 показывает, что на кривых, отражающих содержание аминокислот в экструдате в зависимости от температуры, отчетливо выделяются три участ-

ка с различным характером протекания процесса экструдирования кормовой смеси.

При температуре 115-121 °C содержание аминокислот в готовом экструдате снижается незначительно. Общее содержание аминокислот при температуре 121 °C снижается на 1,9-2,4 отн.% по сравнению с содержанием при температуре 115 °C. Содержание незаменимых аминокислот уменьшается при этом на 2,6-3,8 отн.%. Установлено, что в данном температурном диапазоне процесс экструдирования протекает неэффективно, не приводя к получению однородного плотного экструдата, что и является причиной незначительного изменения содержания аминокислот.

В диапазоне 121-135 °C наблюдается более значительное снижение содержания аминокислот, причем скорость снижения этого показателя увеличивается по сравнению с диапазоном 115-121 °C. Общее содержание аминокислот в экструдате при температуре 135 °C на 23,3-29,6 % ниже, чем при температуре 121 °C. Содержание незаменимых аминокислот уменьшается при этом на 28,1-29,3 %. Именно в этом диапазоне температуры был получен однородный плотный экструдат хорошего качества. Таким образом, снижение содержания аминокислот на 23,3-29,6 % озна-

чают, в данном случае, эффективное протекание процесса экструдирования кормовой смеси, в ходе которого происходит деструкция сво-

бодных аминокислот. Возможно, в этом диапазоне, особенно при температуре 130-135 °С, реакция Майяра протекает более активно.

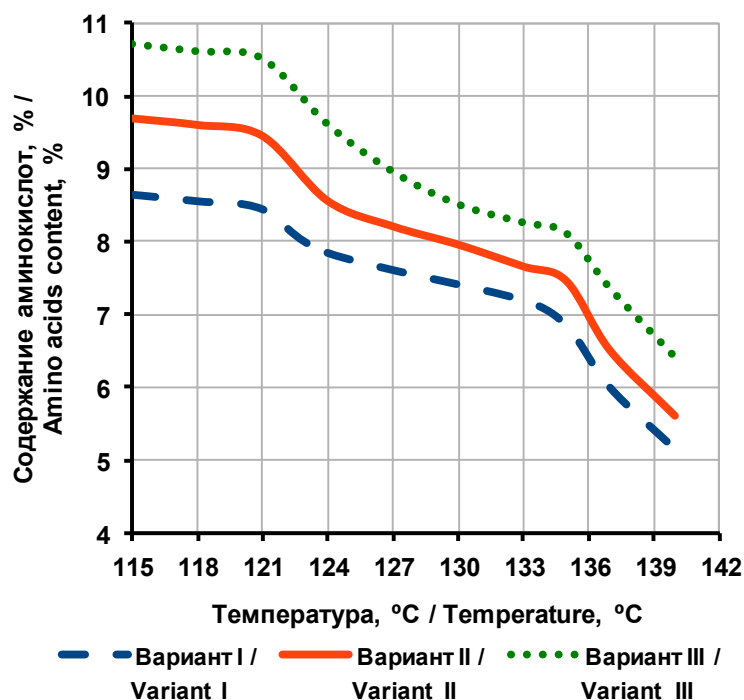


Рис. 3. Зависимость общего содержания аминокислот в экструдированном корме от температуры экструдирования

Fig. 3. The correlation between the general amino acids content in the extruded feed and the extrusion temperature

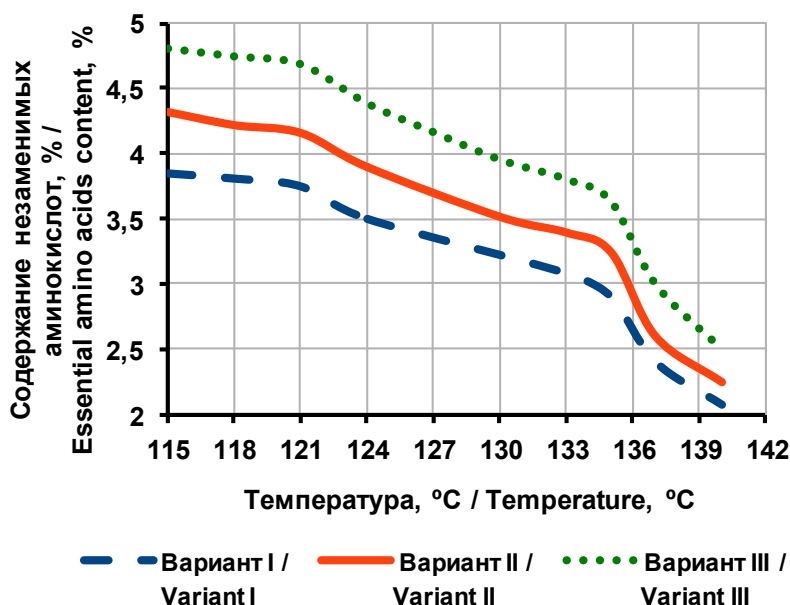


Рис. 4. Зависимость содержания незаменимых аминокислот в экструдированном корме от температуры экструдирования

Fig. 4. The correlation between indispensable amino acids content in the extruded feed and the extrusion temperature

Диапазон 135-140 °C характеризуется резким снижением содержания аминокислот в готовом экструдате. Общее содержание аминокислот в экструдате, полученном при температуре 140 °C, на 26,5-33,0 % ниже, чем при температуре 135°C. Содержание незаменимых аминокислот уменьшается при этом на 40-45 %. В этом диапазоне температуры был получен экструдат неудовлетворительного качества. Очевидно, значительное снижение содержания аминокислот вызвано их взаимодействием с сахарами и образованием меланоидинов (реакция Майяра). Это подтверждается и значительно более темным цветом полученного при температуре 135-140 °C экструдата. Также происходит подгорание

экструдата, вызывающее термическое разрушение аминокислот.

На рисунке 5 представлен график зависимости содержания незаменимых аминокислот в экструдированном корме от температуры экструдирования и содержания биомассы личинок черной львинки в кормовой смеси. График показывает, что протекание процесса экструдирования мало зависит от содержания биомассы личинок насекомых в кормовой смеси, основное влияние на него оказывает температура экструдирования. При увеличении температуры экструдирования происходит снижение общего содержания аминокислот и содержания незаменимых аминокислот в готовом экструдате.

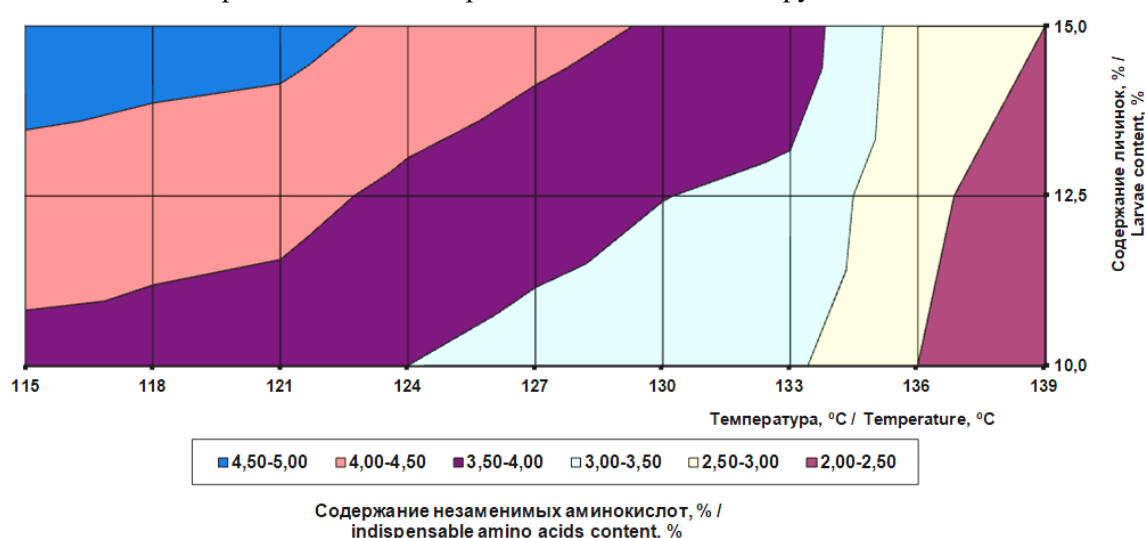


Рис. 5. Зависимость содержания незаменимых аминокислот в экструдированном корме от температуры экструдирования и содержания биомассы личинок насекомых в кормовой смеси

Fig. 5. The correlation between indispensable amino acids content in the extruded feed and the extrusion temperature and larvae biomass content in the feed mixture

Анализ экспериментальных данных (рис. 3, 4, 5, табл. 1, 2) показал, что общее содержание аминокислот в экструдате, произведенном при температуре 121 °C, в среднем составляет 69 % от первоначального их содержания до экструдирования. Содержание незаменимых аминокислот в таком экструдате составляет 78,6 % от первоначального. Таким образом, экструдирование кормовой смеси в диапазоне температур 118-121 °C снижает содержание аминокислот на 31 % (незаменимых на 21,4 %).

Общее содержание аминокислот в экструдате, произведенном при температуре 135 °C составляет в среднем 50,8 % от первоначального их содержания в исходной кормовой смеси, содержание незаменимых аминокислот – составляет 52,1 % от первоначального. Таким образом, экструдирование кормовой смеси

в диапазоне температур 121-135 °C снижает содержание аминокислот еще примерно на 20 % (незаменимых на 26 %).

При температуре экструдирования более 135°C содержание аминокислот уменьшается значительно быстрее, составляя при температуре 139 °C 41,7 % от первоначального (для незаменимых 42,7 %).

По показателю снижения содержания аминокислот по сравнению с первоначальным между вариантами кормовой смеси не выявлено статистически значимых различий ($p > 0,05$). Это также подтверждает, что содержание личинок насекомых в кормовой смеси не влияет на сохранность аминокислот в результате экструдирования. Также можно сделать вывод о том, что осуществлять экструдирование при температуре экструдата

более 135 °С не следует, так это приведет к снижению содержания аминокислот в готовом корме более чем наполовину по сравнению с первоначальным.

Наглядно оценить влияние температуры на процесс экструдирования кормовой смеси позволяет мгновенная скорость изменения содержания аминокислот в экструдате (табл. 3).

Таблица 3 – Мгновенная скорость изменения содержания аминокислот в экструдате из зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки при различной температуре экструдирования (относительно общего содержания различных веществ в экструдате), %/°С

Table 3 – Instantaneous rate of amino acids content change in the extrudate containing black soldier fly larvae biomass and wheat grain at varying extrusion temperature (in relation to the general content of different substances in the extrudate), %/°С

Диапазон температуры, °С / Range of temperature, °С	I вариант / I variant		II вариант / II variant		III вариант / III variant	
	биомасса личинок 10 % + зерно пшеницы 90 %) / larvae biomass 10 % + wheat grain 90 %)		биомасса личинок 12,5 % + зерно пшеницы 87,5 %) / larvae biomass 12.5 % + wheat grain 87.5 %)		биомасса личинок 15 % + зерно пшеницы 85 %) / (larvae biomass 15 % + wheat grain 85 %)	
	для всех аминокислот / for all amino acids	для незаменимых аминокислот / for indispensable amino acids	для всех аминокислот / for all amino acids	для незаменимых аминокислот / for indispensable amino acids	для всех аминокислот / for all amino acids	для незаменимых аминокислот / for indispensable amino acids
115-121	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03	0,02
121-135	0,17	0,06	0,14	0,07	0,17	0,07
135-140	0,34	0,17	0,37	0,2	0,34	0,23

При изменении температуры в диапазоне 115-121 °С средняя мгновенная скорость изменения общего содержания аминокислот составляет 0,033 %/°С, а незаменимых аминокислот – 0,023 %/°С. Такая незначительная скорость изменения содержания аминокислот указывает на неэффективное протекание процесса экструдирования.

При изменении температуры в диапазоне 121-135 °С средняя мгновенная скорость изменения общего содержания аминокислот увеличивается и составляет 0,16 %/°С, а незаменимых аминокислот – 0,007 %/°С. Это указывает на эффективное протекание процесса экструдирования кормовой смеси.

При изменении температуры в диапазоне 135-140 °С средняя мгновенная скорость изменения общего содержания аминокислот значительно увеличивается и составляет 0,35 %/°С, а незаменимых аминокислот – 0,2 %/°С. Таким образом, в диапазоне 135-140 °С при увеличении температуры общее содержание аминокислот снижается в среднем в 2,5 раза быстрее, чем в диапазоне 121-135 °С. Содержание незаменимых аминокислот при этом снижается в сред-

нем в 2,85 раза быстрее. Это подтверждает нерациональность экструдирования кормовой смеси в данном диапазоне температур по причине плохой сохранности аминокислот.

Сравнение результатов для разных вариантов кормовой смеси, приведенных в таблице 3, показывает, что мгновенная скорость изменения содержания аминокислот в процессе экструдирования не имеет зависимости от содержания биомассы личинок в смеси и определяется лишь температурой экструдирования.

Анализ результатов экспериментов показывает, что отсутствуют факторы, ограничивающие возможность эффективного экструдирования кормовой смеси зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки при содержании насекомых до 15 %, а возможно и более. Можно предположить, что установленные в результате экспериментов закономерности действительно и для случаев экструдирования кормовых смесей из зерна и иного богатого белком сырья животного происхождения.

Эффективное осуществление процесса экструдирования кормовой смеси из зерна и биомассы насекомых зависит от температуры.

Экструдат удовлетворительного качества может быть получен при температуре от 121 до 135 °С. Но с увеличением температуры неуклонно снижается содержание аминокислот в готовом экструдате. Поэтому необходимо определить рациональный диапазон температуры экструдирования кормовой смеси, при котором процесс протекает удовлетворительно, но еще не происходит значительного снижения содержания аминокислот в экструдате.

В качестве показателя, определяющего рациональный температурный диапазон экструдирования, лучше всего использовать содержание незаменимых аминокислот в готовом экструдате. По нашему мнению, для экструдирования следует использовать такие значения температуры, при которых содержанием незаменимых аминокислот в экструдате не более чем на 30 % ниже, чем в исходной кормовой смеси. Этому требованию соответствует диапазон температуры экструдирования 121-127 °С. Этот диапазон выявлен для кормовой смеси с содержанием личинок до 15 % (по массе). Однако можно предположить, что диапазон 121-127 °С будет рациональным и для экструдирования кормовых смесей с большим содержанием личинок черной львинки. Также можно предположить, что возможно эффективное производство экструдированного корма из смеси личинок насекомых и зерна других зерновых культур, например ячменя или сорго.

Заключение. В результате экспериментальных исследований установлено, что кормовая смесь, состоящая из измельченного зерна пшеницы и биомассы личинок черной львинки (10-15 % по массе), может быть успешно подвергнута экструдированию при температуре 121-135 °С (температура готового экструдата). В данном диапазоне температур был получен экструдат хорошего качества.

Добавление к зерну личинок насекомых на 68-105 % увеличивает содержание протеина, в том числе незаменимых аминокислот, в готовом корме. Экструдированный корм может быть использован для кормления сельскохозяйственных животных, в частности свиней, в целом виде либо как один из компонентов комбикорма. При увеличении массовой доли биомассы личинок насекомых такой корм может быть использован для кормления рыб.

Установлено, что при увеличении температуры экструдирования в диапазоне 115-140 °С содержание аминокислот в готовом экструдате из зерна пшеницы и личинок насекомых снижается. Изменение содержания личинок насекомых в кормовой смеси не оказы-

вает влияния на характер зависимости содержания аминокислот в экструдате от температуры экструдирования и протекание процесса экструдирования.

Установлено, что существуют три температурных диапазона, в которых процесс экструдирования кормовой смеси протекает различно. При температуре 115-121 °С содержание аминокислот в готовом экструдате снижается незначительно, но процесс экструдирования протекает неэффективно, не приводя к получению однородного экструдата. В диапазоне 121-135 °С наблюдается более значительное снижение содержания аминокислот, процесс экструдирования протекает эффективно, приводя к получению однородного экструдата. Диапазон 135-140 °С характеризуется резким снижением содержания аминокислот в экструдате и его подгоранием.

Установлено, что содержание аминокислот в экструдированном корме при увеличении температуры уменьшается с возрастающей скоростью независимо от содержания биомассы насекомых в кормовой смеси. Мгновенная скорость изменения содержания аминокислот в процессе экструдирования не имеет значимой зависимости от содержания биомассы личинок в смеси и определяется лишь температурой процесса.

Полученные данные согласуются с результатами исследований Ottoboni et al. [30], который установил, что в процессе экструдирования смеси пшеницы и высушенных личинок по достижении определенной температуры содержание аминокислот линейно уменьшается. В наших опытах такое явление наблюдалось при экструдировании в диапазоне 121-135 °С.

Определен рациональный диапазон температуры экструдирования кормовой смеси из зерна пшеницы и личинок насекомых – 121-127 °С, обеспечивающий снижение содержания незаменимых аминокислот в экструдате не более чем на 30 % по сравнению с их содержанием в исходном сырье. Полученный при данных параметрах экструдированный корм, включающий 15% биомассы насекомых, содержит 9,6 % аминокислот, в том числе 4,38 % незаменимых, что на 105 и 165% больше, чем в экструдате только из пшеницы.

Предлагаемая технология обработки личинок насекомых и их введения в состав корма является значительно более простой и, следовательно, более дешевой, чем используемая технология разделения биомассы насекомых

на жировую и протеиновую фракции с последующей сушкой последней для получения белковой муки. Благодаря этому производить такой корм могут и малые предприятия, например аквакультурные фермы.

Экструдирование биомассы насекомых в смеси с зерном зерновых культур является перспективным направлением совершенствования производства кормов для рыб и сельскохозяйственных животных.

Список литературы

1. Kim S. W., Less J. F., Wang L., Yan T., Kiron V., Kaushik S. J., Lei X. G. Meeting global feed protein demand: challenge, opportunity, and strategy. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2019;7(1):17.1-17.23. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-030117-014838>
2. Пономарев С., Федоровых Ю., Ширина Ю., Левина О., Куркембаева Б., Порфирьев А., Ушакова Н., Новиков С. Корма для ценных объектов аквакультуры: проблемы и решения. *Комбикорма*. 2019;4:57-58. DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-04-3-062>
3. Ponomarev S., Fedorovich Yu., Shirina Yu., Levina O., Kurkembayeva B., Porfir'ev A., Ushakova N., Novikov S. *Korma dlya tscennykh ob'ektov akvakul'tury: problemy i resheniya*. [Feed for valuable objects of aquaculture: problems and decisions]. *Kombikorma*. 2019;4:57-58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-04-3-062>
4. Ayadi F. Y., Rosentrater K. A., Muthukumarappan K. Alternative protein sources for aquaculture feeds. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*. 2012;4(1):1-26. DOI: <https://doi.org/10.3923/joafsnu.2012.1.26>
5. Агеев В. Ю., Микаелян А. Р., Кошак Ж. В., Бабаян Б. Г., Дегтярик С. М. Современные тенденции в разработке эффективных комбикормов для рыб. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук*. 2019;57(3):315-331. DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-3-323-333>
6. Ageets V. Yu., Mikaelyan A. R., Koshak Zh. V., Babayan B. G., Degtyarik S. M. *Sovremennye tendentsii v razrabotke effektivnykh kombikormov dlya ryb*. [Ways to improve efficiency of compound feed for fish]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya agrarnykh nauk*. 2019;57(3):315-331. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-3-323-333>
7. Протеины: новое в технологии производства и возможности использования. *Комбикорма*. 2017;10:59-62. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/10_17/10_2017_059-062.pdf
8. *Proteiny: novoe v tekhnologii proizvodstva i vozmozhnosti ispol'zovaniya*. [Proteins: new technologies in the production and possibility of use]. *Kombikorma*. 2017;10:59-62. (In Russ.). URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/10_17/10_2017_059-062.pdf
9. Van Huis A. Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a review. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2020;6(1):27-44. DOI: <https://doi.org/10.3920/jiff2019.0017>
10. Wang Y. S., Shelomi M. Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food. *Foods*. 2017;6(10):91. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods6100091>
11. Ушакова Н. А., Бастратов А. И., Карагодин В. П., Павлов Д. С. Особенности биоконверсии органических отходов личинками мухи *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae, Linnaeus, 1758). *Успехи современной биологии*. 2018;138(2):172-182. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0042132418020060>
12. Ushakova N. A., Bastrakov A. I., Karagodin V. P., Pavlov D. S. *Osobennosti biokonversii organicheskikh otkhodov lichinkami mukhi Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae, Linnaeus, 1758)*. [Specific features of bio-conversion of organic waste by *Hermetia illucens* larvae (Diptera: Stratiomyidae, Linnaeus, 1758)]. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2018;138(2):172-182. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0042132418020060>
13. Некрасов Р. В., Чабаяев М. Г., Зеленченкова А. А., Бастратов А. И., Ушакова Н. А. Питательные свойства личинок *Hermetia Illucens* L. – нового кормового продукта для молодняка свиней (*Sus Scrofa Domesticus Erxleben*). *Сельскохозяйственная биология*. 2019;54(2):316-325. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.2.316rus>
14. Nekrasov R. V., Chabaev M. G., Zelenchenkova A. A., Bastrakov A. I., Ushakova N. A. *Pitatel'nye svoystva lichinok Hermetia Illucens L. – novogo kormovogo produkta dlya molodnyaka sviney (Sus Scrofa Domesticus Erxleben)*. [Nutritional properties of *Hermetia illucens* L., a new feed product for young pigs (*Sus scrofa domesticus Erxleben*)]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2019;54(2):316-325. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.2.316rus>
15. Ушакова Н. А., Бродский Е. С., Коваленко А. А., Бастратов А. И., Козлова А. А., Павлов Д. С. Особенности липидной фракции личинок чёрной львинки *Hermetia illucens*. *Доклады Академии наук*. 2016;468(4):462-462. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565216160258>
16. Ushakova N. A., Brodskiy E. S., Kovalenko A. A., Bastrakov A. I., Kozlova A. A., Pavlov D. S. *Osobennosti lipidnoy fraktsii lichinok chernoy l'vinki Hermetia illucens*. [Features of black soldier fly larvae lipidic fraction]. *Doklady Akademii nauk*. 2016;468(4):462-462. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565216160258>
17. Nekrasov R., Zelenchenkova A., Chabaev M., Ivanov G., Antonov A., Pastukhova N. PSIII-37 Dried Black Soldier Fly larvae as a dietary supplement to the diet of growing pigs. *Journal of Animal Science*. 2018;96(S.3):314-314. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky404.691>

12. Caligiani A., Marseglia A., Leni G., Baldassarre S., Maistrello L., Dossena A., Sforza S. Composition of black soldier fly prepupae and systematic approaches for extraction and fractionation of proteins, lipids and chitin. *Food Research International*. 2018;105:812-820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.012>
13. Тупольских Т. И., Яковлев Д. А., Рудой Д. В., Сердюк В. А. Биотехнология переработки органических отходов с получением белковых продуктов. *Современная наука и инновации*. 2019;1:148-153. DOI: <https://doi.org/10.33236/2307-910X-2019-25-1-147-152>
14. Tupol'skikh T. I., Yakovlev D. A., Rudoy D. V., Serdyuk V. A. *Biotehnologiya pererabotki organicheskikh otkhodov s polucheniem belkovykh produktov*. [Biotechnology of organic wastes recycling with protein production]. *Sovremennaya nauka i innovatsii*. 2019;1:148-153. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33236/2307-910X-2019-25-1-147-152>
15. Makkar H. P. S., Tran G., Heuze V., Ankers P. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*. 2014;197:1-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>
16. Schiavone A., Dabbou S., De Marco M., Cullere M., Biasato I., Biasibetti E., Capucchio M. T., Bergagna S., Dezzutto D., Mrnrguz M., Gai F., Dalle Zotte A., Gasco L. Black soldier fly larva fat inclusion in finisher broiler chicken diet as an alternative fat source. *Animal*. 2018;12(10):2032-2039. DOI: <https://doi.org/10.1017/s1751731117003743>
17. Olsen R. L., Hasan M. R. A limited supply of fishmeal: Impact on future increases in global aquaculture production. *Trends in Food Science & Technology*. 2012;27(2):120-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.003>
18. Irungu F. G., Mutungi C., Faraj A., Affognon H., Ekesi S., Nakimbugwe D., Fiaboe K. K. Optimization of extruder cooking conditions for the manufacture of fish feeds using response surface methodology. *Journal of Food Process Engineering*. 2018;42(2):e12980. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12980>
19. Irungu F. G., Mutungi C. M., Faraj A. K., Affognon H., Kibet N., Tanga C., Ekesi S., Nakimbugwe D., Fiaboe K. K. M. Physico-chemical properties of extruded aquafeed pellets containing black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and adult cricket (*Acheta domesticus*) meals. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2018;4(1):19-30. DOI: <https://doi.org/10.3920/jiff2017.0008>
20. Irungu F. G., Mutungi C. M., Faraj A. K., Affognon H., Ekesi S., Nakimbugwe D., Fiaboe K. K. M. Proximate composition and in vitro protein digestibility of extruded aquafeeds containing *Acheta domesticus* and *Hermetia illucens* fractions. *Journal of Insects as Food and Feed*. 2018;4(4):275-284. DOI: <https://doi.org/10.3920/jiff2017.0089>
21. Alam M. S., Kaur J., Khaira H., Gupta K. Extrusion and Extruded Products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2015;56(3):445-473. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
22. Glencross B., Hawkins W., Evans D., Rutherford N., McCafferty P., Dods K., Hauler R. A comparison of the effect of diet extrusion or screw-press pelleting on the digestibility of grain protein products when fed to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 2011;312(1-4):154-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.025>
23. Яковлев Д. А., Михайлова П. К., Вифлянцева Т. А., Рудой Д. В., Сердюк В. А. Разработка технологии разделения предкуколки мухи черной львинки на фракции. Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Междунар. научн.-практ. конф. Ростов-на-Дону: ДГТУ-Принт, 2019. С. 118-122.
24. Yakovlev D. A., Mikhaylova P. K., Viflyantseva T. A., Rudoy D. V., Serdyuk V. A. *Razrabotka tekhnologii razdeleniya predkukolki mukhi chernoy l'vinki na fraktsii*. [Development of the fraction separation technology for black soldier fly prepupae]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.* [Current state and development trends of agricultural engineering: *International scientific and practical Conf.*]. *Rostov-na-Donu: DGTU-Print*, 2019. pp. 118-122.
25. Мартинчик А. Н., Шариков А. Ю. Влияние экструзии на сохранность аминокислот и пищевую ценность белка. Вопросы питания. 2015;84(3):13-21. DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2015-00018>
26. Martinchik A. N., Sharikov A. Yu. *Vliyanie ekstruzii na sokhrannost' aminokislot i pishchevuyu tsennost' belka*. [Effect of extrusion on the retention of amino acids and the nutritional value of the protein]. *Voprosy pitaniya*. 2015;84(3):13-21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2015-00018>
27. De Oliveira F. C., Coimbra J. S. dos R., de Oliveira E. B., Zuniga A. D. G., Rojas E. E. G. Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the maillard reaction: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2014;56(7):1108-1125. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.755669>
28. Singh S., Gamlat S., Wakeling L. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science & Technology*. 2007;42(8):916-929. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x>
29. Alam M. R., Scampicchio M., Angeli S., Ferrentino G. Effect of hot melt extrusion on physical and functional properties of insect based extruded products. *Journal of Food Engineering*. 2019;259:44-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.021>
30. Яковлев Д. А., Сердюк В. А., Михайлова П. К., Вифлянцева Т. А., Бабаджанян А. С., Тупольских Т. И. Разработка автономного инсектария для воспроизведения мухи черной львинки. Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Междунар. научн.-практ. конф. Ростов-на-Дону: ДГТУ-Принт, 2019. С. 554-559.
31. Yakovlev D. A., Serdyuk V. A., Mikhaylova P. K., Viflyantseva T. A., Babadzhanyan A. S., Tupol'skikh T. I. *Razrabotka avtonomnogo insektariya dlya vosproizvedeniya mukhi chernoy l'vinki*. [Development of autonomous insectary for reproduction of black soldier fly].

tarium for reproduction of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.* [Current state and development trends of agricultural engineering: International scientific and practical Conf.]. Rostov-na-Donu: DGTU-Print, 2019. pp. 554-559.

28. Liu X., Chen X., Wang H., Yang Q., ur Rehman K., Li W., Cai M., Li Q., Mazza L., Zhang J., Yu Z., Zheng L. Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly. *PLOS ONE*. 2017;12(8):e0182601. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182601>

29. Desiderio C., Iavarone F., Rossetti D. V., Messina I., Castagnola M. Capillary electrophoresis-mass spectrometry for the analysis of amino acids. *Journal of Separation Science*. 2010;33(16):2385-2393. DOI: <https://doi.org/10.1002/jssc.201000171>

30. Ottoboni M., Sprangers T., Pinotti L., Baldi A., De Jaeghere W., Eeckhout M. Inclusion of *Hermetia Illucens* larvae or prepupae in an experimental extruded feed: process optimisation and impact on in vitro digestibility. *Italian Journal of Animal Science*. 2017;17(2):418-427. DOI: <https://doi.org/10.1080/1828051x.2017.1372698>

Сведения об авторах

Пахомов Виктор Иванович, доктор техн. наук, заместитель директора по науке по механизации и электрификации, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, e-mail: vnptim@gmail.com

Брагинец Сергей Валерьевич, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, e-mail: sbraginet@mail.ru

✉ **Бахчевников Олег Николаевич**, кандидат техн. наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Алферов Александр Сергеевич, кандидат техн. наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>, e-mail: alfa-8303@yandex.ru

Рухляда Артем Игоревич, младший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2597-0818>, e-mail: Ruhlada1990@yandex.ru

Бабаджанян Аркадий Спартакович, ассистент кафедры «Технологии и оборудование переработки продукции АПК», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», пл. Гагарина 1, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344010, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6436-0628>, e-mail: babajanyan.arkady2015@yandex.ru

Information about the authors

Viktor I. Pakhomov, D.Sc. in Engineering, Deputy Director for Science of Mechanization and Electrification, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, e-mail: vnptim@gmail.com

Sergey V. Braginet, Ph.D in Engineering, leading researcher, the Department of Plant Product Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, e-mail: sbraginet@mail.ru

✉ **Oleg N. Bakhchevnikov**, Ph.D in Engineering, researcher, the Department of Plant Product Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Aleksander S. Alferov, Ph.D in Engineering, researcher, the Department of Plant Product Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>, e-mail: alfa-8303@yandex.ru

Artem I. Rukhlyada, junior researcher, the Department of Plant Product Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2597-0818>, e-mail: Ruhlada1990@yandex.ru

Arkady S. Babajanyan, research assistant, the Department of Technologies and Equipment for Processing of Agro-industrial Complex Production, Don State Technical University, sq. Gagarina, 1, Rostov-on-Don, 344010, Russia, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6436-0628>, e-mail: babajanyan.arkady2015@yandex.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author