

DOI 10.33952/2542-0720-2021-1-25-38-49

УДК 631.363.285:636.085.55:639.3.043

Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Хлыстунов В. Ф.

ЭКСТРУДИРОВАНИЕ КОРМОВ ДЛЯ АКВАКУЛЬТУРЫ (ОБЗОР)

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»»

Реферат. Экструдирование является одной из важнейших технологических операций при производстве комбикормов для аквакультуры. В результате экструдирования значительно повышается усвояемость питательных веществ корма. В обзоре рассмотрены вопросы экструдирования смесей растительного и животного сырья при производстве комбикормов для аквакультуры. Анализ научных публикаций по исследуемой теме показал, что процесс экструзии многокомпонентных смесей (комбикорма) еще недостаточно изучен. Целью исследования является обобщение и анализ научных публикаций, посвященных технологиям экструдирования комбикормов для рыб, уточнение информации о рациональных параметрах их осуществления и влиянии на свойства готовых кормов. Выполнены поиск, отбор и систематический обзор высокоцитируемых научных статей на английском языке по теме исследования за период 2000–2020 гг. В ходе анализа литературных источников установлено, что в наибольшей степени на свойства готового корма влияют температура экструдирования, влажность сырья и частота вращения шнека экструдера. Установлены закономерности изменения свойств гранул готового корма в результате изменения значений параметров экструдирования. Результаты проанализированных исследований позволили установить особенности экструдирования аквакультурных комбикормов на основе растительного сырья. Данный прием повышает усвояемость компонентов растительного сырья, в частности крахмала. Определены закономерности экструдирования комбикормов для рыб, содержащих белковое сырье животного происхождения, в частности новый его вид – биомассу насекомых, который может с успехом заменить в их составе дорогостоящую рыбную муку. Фактором, ограничивающим применение в кормах для рыб животного сырья, в частности насекомых, является его высокая влажность, которая для эффективного протекания процесса экструдирования не должна превышать 30 %. Снизить влажность кормовой смеси возможно, комбинируя различные виды животного и растительного сырья с высокой и низкой влажностью, что позволит обеспечить приемлемую влажность смеси и получить экструдированный корм хорошего качества. Тематика экструдирования комбикормов для аквакультуры является перспективной, но требует проведения дополнительных исследований для определения параметров процесса экструдирования, общих для всех видов растительного и животного сырья и их смесей.

Ключевые слова: корма, корма для аквакультуры, корма для рыб, экструдированные корма, экструдирование, экструдат, технологические параметры, свойства экструдата.

Для цитирования: Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Хлыстунов В. Ф. Экструдирование кормов для аквакультуры (обзор) // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 1(25). С. 38–49. DOI 10.33952/2542-0720-2021-1-25-38-49.

For citation: Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Khlystunov V. F. Aquafeed extrusion (review) // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 1(25). P. 38–49. DOI 10.33952/2542-0720-2021-1-25-38-49.

Введение

В настоящее время значительную часть растительного и животного сырья, используемого при производстве кормов для аквакультуры, подвергают экструдированию [1]. Также экструзии все чаще подвергают рассыпной комбикорм, приготовленный в результате смешивания предварительно подготовленного сырья, получая корм в форме частиц (гранул) с заданными размерами и свойствами (объемная плотность, пористость и др.) [2, 3].

Основным достоинством этой технологической операции является трансформация структуры сырья, его физических свойств, питательной ценности и химического состава в ходе экструзии [4]. Экструдирование дает возможность изменять свойства готового корма в широких пределах путем варьирования параметров технологического процесса [5].

Имеется множество научных публикаций, в которых изложены результаты исследований по экструдированию одного вида сырья, реже – смеси двух компонентов. Однако процесс экструзии многокомпонентных смесей, которыми являются комбикорма для аквакультуры, еще недостаточно изучен. В то же время уже установленные закономерности процесса экструдирования комбикормов нуждаются в уточнении в связи с тенденцией включения в их состав новых нетрадиционных компонентов (водоросли, грибы, насекомые и др.) [6].

Кроме того, опубликовано мало научных статей, посвященных установлению оптимальных параметров экструдирования комбикормов для рыб. Вероятно, это связано с тем, что эти исследования выполняются в интересах зарубежных фирм-производителей комбикормов, которые не заинтересованы в обнародовании их результатов. Это создает трудности в получении необходимой информации для российских ученых и технологов, занимающихся вопросами приготовления ранее не производившихся в нашей стране аквакультурных экструдированных комбикормов.

Все это потребовало проведения систематического обзора и критического анализа иностранных научных публикаций, посвященных экструдированию кормов для аквакультуры.

Цель исследований – обобщение и анализ англоязычных научных публикаций, посвященных технологиям экструдирования комбикормов для рыб, уточнение информации о рациональных параметрах их осуществления и влиянии на свойства готовых экструдированных кормов.

Материалы и методы исследований

Выбор и систематический обзор научной литературы по теме исследования выполнен по методу С. Okoli [7] и R. J. Torrasco [8].

Для выбора научных статей провели поиск по соответствующим ключевым словам в библиографических базах данных «Scopus» и «Google Scholar». Дополнительно провели обзор научных журналов по тематике исследования. При выборе статей для обзора отдавали приоритет высокоцитируемым источникам. Были просмотрены списки литературы отобранных статей для выявления дополнительных релевантных источников информации.

Поиск публикаций осуществляли по следующим ключевым словам и их комбинациям: feed (корма), extrusion (экструдирование), aquafeed (корма для аквакультуры), fish feed (корма для рыбы), extruded feed (экструдированные корма), extruded aquafeed (экструдированные корма для аквакультуры), extruded fish feed (экструдированные корма для рыбы).

В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был избран интервал 2000–2020 гг. Более ранние научные статьи изучали лишь при отсутствии новейших публикаций по конкретному аспекту исследуемой темы.

Результаты и их обсуждение

Параметры процесса экструдирования и свойства комбикормов для аквакультуры.

В качестве переменных параметров, меняющих течение процесса экструдирования и свойства готового экструдированного корма, обычно выступают: скорость подачи сырья, частота вращения шнека экструдера, диаметр его фильера, температура экструдирования, давление на выходе из экструдера [4, 5, 9]. Важное значение имеют свойства сырья, особенно его влажность, гранулометрический и химический состав (содержание протеина, липидов, углеводов и др.) [4, 10].

Параметры процесса экструдирования изменяют в определенных пределах, чтобы добиться получения гранул комбикорма с требуемыми свойствами [2, 10].

Традиционно для оценки качества экструдата используют такие его свойства, как индекс расширения, твердость, влажность, питательная ценность, сохранность питательных веществ [10, 11].

Особенности применения аквакультурных кормов состоят в том, что при кормлении рыб гранулы помещают в воду, где они, в зависимости от вида рыбы, должны плавать на поверхности, либо тонуть с определенной скоростью, а также сохранять целостность в течение заданного промежутка времени [12]. Поэтому, помимо приведенных выше показателей качества, для аквакормов важнейшее значение имеют «водные свойства»: водостойкость, плавучесть, индекс водопоглощения (WAI), индекс водной растворимости (WSI), а также объемная плотность [13, 14].

Другая особенность комбикормов для рыб – большое содержание жиров – до 40 % [15]. Так как такая высокая жирность сырья значительно затруднила бы процесс экструдирования, то уже после завершения этой технологической операции жиры вводят в состав гранул корма путем обычного или вакуумного напыления. Поэтому важным свойством экструдированных комбикормов для рыб является высокая пористость, позволяющая поглощать в больших дозах растительные и животные жиры [16]. Об увеличении пористости судят по уменьшению объемной плотности экструдата [14].

Общие параметры и закономерности экструдирования кормов для аквакультуры.

Общеизвестно, что в результате экструдирования готовый продукт приобретает пористую структуру и расширяется [1]. Результат этого процесса количественно выражается через индекс расширения экструдата.

Наибольшее влияние на индекс расширения и объемную плотность экструдата оказывают влажность, температура и частота вращения шнека экструдера [1, 11, 17]. Температура экструдирования и влажность сырья влияют, в основном, на величины водных индексов экструдатов [1, 18].

Влажность сырья значительно влияет на свойства готового экструдата [17]. Низкая влажность сырья препятствует эффективному осуществлению процесса экструдирования корма, приводя к получению экструдата с малым индексом расширения и высокой объемной плотностью [19]. Увеличение влажности сырья приводит к лучшему расширению экструдата и снижению объемной плотности. Но по достижении определенного уровня влажности снижается вязкость экструдированного материала и индекс его расширения [20]. M. Thiébaud объясняет это тем, что при постоянной температуре увеличение влажности приводит к меньшей текстуризации экструдата [21]. Он сообщает, что при экструдировании смеси рыбы и сои (*Glycine max* L.) наилучшая текстуризация экструдата наблюдалась при температуре 140–180 °С и низкой влажности 15 %.

Shukla C. Y. сообщает, что при экструдировании корма на основе зерна пшеницы с влажностью 11, 15 и 20 % максимальные значения индекса водопоглощения и индекса водной стабильности наблюдали при влажности сырья 15 % [22].

Rodriguez-Miranda J. с соавторами исследовал процесс экструдирования аквакормов [23, 24]. Он установил, что влажность сырья является менее значимым фактором для изменения индекса расширения и водостойкости гранул корма, чем температура и частота вращения шнека экструдера.

Ali S. исследовал экструдирование комбикорма для рыбы (плавающие гранулы) при влажности сырья 20, 25, 30 и 35 % и установил, что уровень влажности 30 % приводит к большему снижению объемной плотности, индекса водной растворимости и водостойкости гранул, чем уровни 20 и 25 % (рисунок 1) [25]. При влажности сырья 35 % экструдирование было затруднено, а при влажности ниже 25 % гранулы корма тонули, так как были слишком плотными. Ali S. также исследовал влияние температуры на свойства экструдата и установил, что для получения водостойких плавающих гранул корма оптимален температурный диапазон 100–110 °С и влажность 30 % (см. рисунок 1) [25].

Температура процесса оказывает значительное влияние на свойства экструдированных аквакультурных кормов, так как именно она определяет степень расширения экструдата [3]. Расширение обычно не происходит при температуре экструдирования менее 100 °С [5].

S. K. Singh установил, что увеличение температуры со 100 до 150 °С привело к увеличению индексов водопоглощения и водной растворимости экструдата [26].

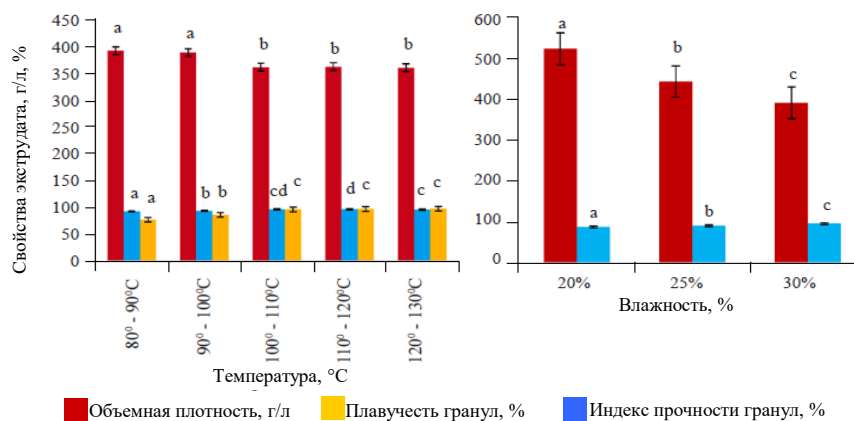


Рисунок 1 – Влияние различных уровней температуры и влажности на свойства экструдированного корма для рыб (Ali S., 2019) [25]

Chevanan N. сообщает о значительном снижении давления на выходе из экструдера (с 13,5 до 3,7 МПа) при повышении температуры с 90 до 160 °С [27]. Аналогично, при увеличении влажности сырья с 15 до 25 % давление снизилось с 12,8 до 5,4 МПа (рисунок 2).

Изменение частоты вращения шнека экструдера также влияет на свойства экструдата [4]. По мнению В. Plattner, ее увеличение снижает объемную плотность экструдата [28]. Rosentrater К. А. сообщает о снижении объемной плотности корма на 12 % и индекса прочности гранул на 13 % при увеличении частоты вращения шнека со 100 до 150 мин⁻¹ [29].

Отношение длины шнека экструдера к его диаметру L/D также влияет на свойства экструдированного корма [4, 5]. Chevanan N. сообщает о том, что увеличение значения L/D с 3,33 до 10 привело к уменьшению объемной плотности экструдата с 47 до 43 г/л и небольшому снижению водостойкости гранул с 94,55 до 94,23 % и индекса водопоглощения с 2,99 до 2,78 [30].

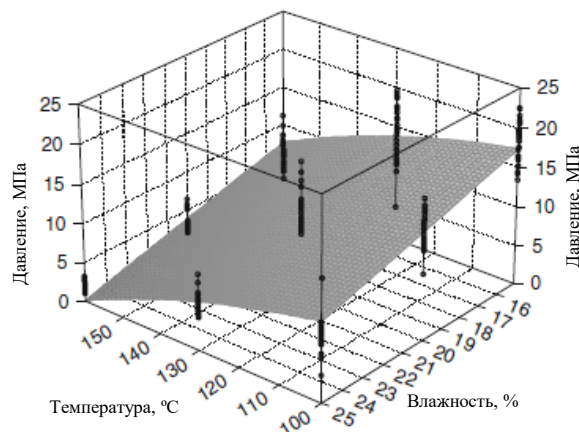


Рисунок 2 – Влияние температуры и влажности на давление на выходе из экструдера (Chevanan N., 2010) [27]

Важной составляющей успешного выполнения процесса экструдирования корма является оптимальный гранулометрический состав сырья [10]. Уменьшение среднего размера частиц сырья способствует лучшему протеканию процесса экструзии, снижая объемную плотность экструдата и повышая водостойкость и индекс водопоглощения гранул экструдированного корма, а также улучшая его переваримость [31].

Riaz M. N. установил, что уменьшение среднего размера частиц сырья с 1,5 до 0,425 мм привело к снижению объемной плотности экструдированного корма с 316 до 232 г/л [32]. Rolfe L. A. сообщает, что уменьшение размера частиц сырья с 1,2 до 0,7 мм привело к увеличению водостойкости и прочности гранул корма [33].

Tumuluru J. исследовал комплексное влияние температуры процесса и влажности сырья, а также частоты вращения шнека и соотношения L/D на водостойкость гранул экструдированного корма и индекс их расширения [16]. Он установил, что водостойкость гранул корма на основе рыбной муки и зерна пшеницы повышается при увеличении температуры экструдирования от 70 до 100 °С, достигая максимального значения 98,1 % при температуре 96,3 °С, после чего начинает снижаться (рисунок 3).

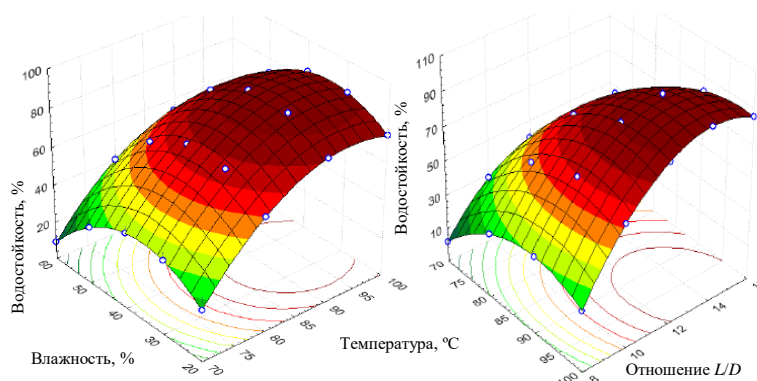


Рисунок 3 – Влияние параметров экструдирования на водостойкость гранул корма для рыб (Tumuluru J., 2013) [16]

При одновременном повышении влажности сырья с 20 до 60 % водостойкость гранул вначале увеличивается, достигая максимума при влажности 33,5 %, а затем снижается, достигая минимального значения 16,4 % при 60 % влажности.

При увеличении отношения длины шнека экструдера к его диаметру L/D в диапазоне от 8 до 16 водостойкость гранул корма повышается, достигая максимума в 98,1 % при $L/D = 13,67$, после чего она снижается (см. рисунок 3).

Tumuluru J. установил, что индекс расширения экструдата достигает максимального значения 0,99 при частоте вращения $60,4 \text{ мин}^{-1}$, $L/D = 12,2$, температуре $68,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажности 33,6 % (рисунок 4) [16].

Аналогично предыдущему, при увеличении температуры, влажности и частоты вращения шнека индекс расширения экструдата сначала увеличивается, достигая максимума, а затем уменьшается [16].

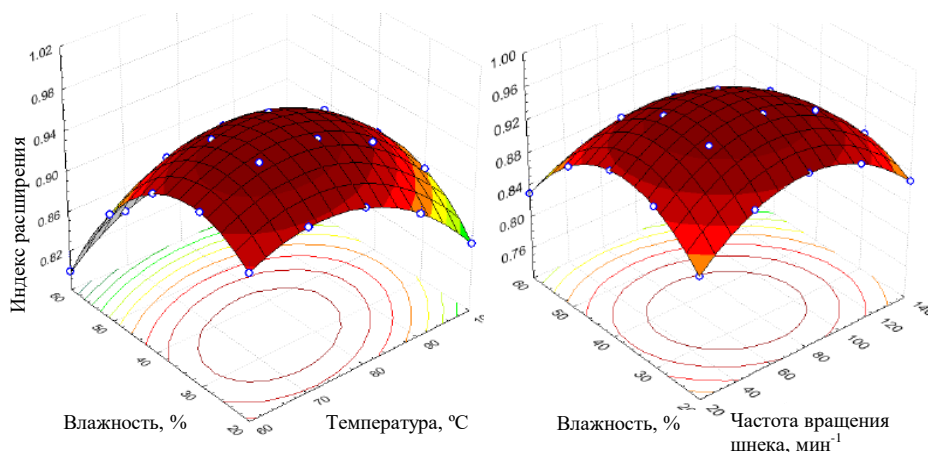


Рисунок 4 – Влияние параметров экструдирования на индекс расширения гранул экструдированного корма для рыб (Tumuluru J., 2013) [16]

Таким образом, разные исследователи установили закономерности изменения свойств экструдированного корма для рыб в результате изменения значений параметров процесса экструдирования.

Особенности экструдирования аквакультурных кормов на основе растительного сырья.

Особенностью кормов на основе растительного сырья является высокое содержание углеводов, в частности крахмала, пищевых волокон и сахаров. Это оказывает значительное влияние на протекание процесса экструдирования кормов [34, 35]. В частности, происходящие при экструзии структурные изменения крахмала способствуют лучшему расширению экструдата [36]. В ходе экструдирования происходит разрушение макромолекул крахмала, приводящее к образованию сахаров и декстринов, что повышает усвояемость корма [1].

Наибольшее влияние на преобразование крахмала при экструзии оказывают температура процесса и влажность сырья [10, 11]. Как сообщает J. De La Rosa-Millan, доля трансформированного крахмала пропорционально увеличивается при повышении температуры и снижении влажности сырья [37].

De Cruz C. R. исследовал процесс экструдирования содержащего значительное количество крахмала корма для рыб на основе клубней таро (*Colocasia esculenta* L.) и зерен риса (*Oryza* L.) [38]. Он установил, что повышение температуры в фильере экструдера с 125 до 170 °C увеличивает индекс расширения на 3,5 %, плавучесть гранул – на 103,6 %, индекс водопоглощения (WAI) – на 13,5 %. При этом уменьшились значения объемной плотности экструдата – на 9,4 % и индекса водной растворимости (WSI) – на 12,2 %.

Umar S. исследовал процесс экструдирования кормов для рыбы на основе

маниокового саго (*Manihot esculenta*) при постоянной температуре 160 °С и различных уровнях влажности сырья – 20, 30 и 40 % [39]. Он установил, что повышение влажности увеличивает значения показателей качества экструдата: объемной плотности с 430 до 491 г/л, плавучести с 25 до 61,7 %, индекса прочности гранул (PDI) с 81 до 86,3 %. Тем самым обеспечивается получение плавучих гранул комбикорма хорошего качества.

Cian R. E. исследовал экструдирование корма для рыб на основе измельченной кукурузы и сои [40]. Установлено, что при повышении температуры с 160 до 200 °С и влажности с 14 до 18 % объемная плотность экструдата увеличивается с 321 до 530 г/л, плавучесть гранул снижается с 96 до 76 %, индекс водопоглощения (WAI) снижается с 4,74 до 2,6, индекс расширения экструдата уменьшается с 2,33 до 1,65.

Solomon S. G. исследовал водостойкость и плавучесть гранул корма для рыб из различного растительного сырья и выяснил, что наилучшую плавучесть имеют гранулы корма на основе зерна пшеницы и кукурузы, а наиболее водостойкими являются корма на основе пшеницы, кукурузного крахмала и кассавы (*Manihot esculenta*) [41].

Результаты проанализированных выше исследований позволили установить особенности экструдирования аквакультурных комбикормов на основе растительного сырья.

Особенности экструдирования аквакультурных кормов на основе животного сырья.

Особенностью комбикормов на основе животного сырья (рыбная мука, рыба, крилевая мука и др.) является высокое содержание протеина. Параметры экструдирования оказывают значительное влияние на свойства и структуру протеина, а также его взаимодействие с другими веществами [42].

Samuelson T. A. исследовал роль качества рыбной муки в получении качественного экструдированного аквакорма [43]. Он полагает, что использование тщательно измельченной рыбной муки с волокнистой структурой позволяет улучшить эффективность процесса экструдирования и повысить качество гранул корма.

В последнее время новым трендом в производстве аквакормов является замена в их составе дорогостоящей рыбной и крилевой муки альтернативными видами богатого белком сырья [44]. Особенно активно в качестве источника животного протеина в кормах используют биомассу насекомых [45]. Поэтому значительное число научных публикаций по теме экструдирования кормов для рыб посвящено именно изучению процесса приготовления комбикормов, включающих биомассу насекомых [2].

Коллектив ученых во главе с F. G. Igunu выполнил исследования процесса экструдирования комбикорма для рыб, включающего муку из домовых сверчков (*Acheta domesticus* L.) и черной львинки (*Hermetia illucens* L.) [46–48]. Они выяснили, что мука из насекомых может служить полноценной заменой крилевой муки в составе корма, и что такая замена не оказывает существенного влияния на свойства экструдата. В частности, при влажности сырья 20 % плавучесть гранул корма была равна 51,3 %, а расширение – 54 %. При этом фактором, ограничивающим применение насекомых, является влажность исходного сырья – для успешного протекания процесса экструдирования она не должна превышать 30 %.

Ottoboni M. исследовал экструдирование комбикорма, включающего личинки насекомого черная львинка (*Hermetia illucens* L.) [49]. Было установлено, что смесь личинок черной львинки и измельченного зерна пшеницы имеет хорошую экструдированность, критерием чего служил низкий эффективный крутящий момент на валу экструдера – 80–100 Н·см. Также установлено, что значительная влажность

личинок насекомых (до 65 %) не препятствует экструдированию корма в случае их использования в смеси с растительным сырьем, что снижает общую влажность смеси.

Alam M. R. исследовал процесс экструдирования смеси измельченного зерна кукурузы и высушенных и измельченных куколок черной львинки в отношении 3:1 и 1:1 [50]. Он установил, что при повышении содержания насекомых в корме уменьшается индекс водопоглощения экструдата (с 4,0 до 2,1 г/г), увеличивается индекс водной растворимости (с 7,5 до 16,8 %) и влажность готового корма (с 34 до 40,7 %). Изменение скорости подачи сырья при экструдировании позволяет изменять свойства готового экструдата: ее повышение приводит к уменьшению индекса водопоглощения и влажности, увеличению индекса водной растворимости.

Weththasinghe P. изучил свойства экструдированного корма для рыб, содержащего муку и пасту из личинок черной львинки [51]. Он установил, что при увеличении содержания насекомых в корме с 6,25 до 25 % происходит снижение расширения экструдата с 6,9 до -9 %, твердости гранул с 37 до 31,3 %, скорости погружения с 0,1 до 0,06 м/с, а прочность гранул меняется незначительно. Тем не менее, такое снижение некоторых показателей не является критическим для экструдированного комбикорма для рыб, а небольшое уменьшение качества компенсируется значительным снижением себестоимости корма.

Результаты проанализированных научных исследований позволили установить особенности экструдирования аквакультурных комбикормов на основе животного сырья. Несмотря на высокую влажность и повышенное содержание жиров, корма для рыб, содержащие биомассу насекомых, могут быть успешно экструдированы.

Выводы

Анализ научных публикаций по исследованной теме показал, что экструдирование является одной из важнейших технологических операций при производстве комбикормов для аквакультуры. В результате экструдирования значительно повышается усвояемость питательных веществ корма, в частности протеина и крахмала.

В ходе анализа литературных источников установлено, что в наибольшей степени на свойства готового экструдата влияют температура экструдирования, влажность сырья и частота вращения шнека экструдера, повышение которых до определенного уровня улучшает протекание процесса и качество готового корма. Установлены закономерности изменения свойств экструдированного корма в результате изменения значений параметров экструдирования.

Определены закономерности экструдирования комбикормов для рыб, содержащих белковое сырье животного происхождения, в частности новый его вид – биомассу насекомых, который, как установлено, может с успехом заменить в их составе дорогостоящую рыбную муку.

Однако почти отсутствуют научные публикации, выявляющие закономерности процесса экструдирования смесей растительного и животного сырья различного состава. Таким образом, не определены рациональные параметры процесса экструдирования смесей растительного и животного сырья, и характер их влияния на свойства готовых экструдатов.

Анализ и проверка результатов исследований, проведенные авторами настоящей статьи, позволили сделать вывод, что фактором, ограничивающим применение в кормах для рыб животного сырья, в частности насекомых, является его высокая влажность, которая для эффективного протекания процесса экструдирования не должна превышать 30 %. Снизить влажность кормовой смеси возможно, комбинируя различные виды животного и растительного сырья с высокой

и низкой влажностью, что позволит обеспечить приемлемую влажность смеси и получить экструдированный корм хорошего качества.

Тематика экструдирования комбикормов для аквакультуры является весьма перспективной, но требует выполнения дополнительных исследований для определения параметров процесса экструдирования, общих для всех видов растительного и животного сырья и их смесей, выявления их влияния на свойства готовых экструдатов.

Литература / References

1. Leonard W., Zhang P., Ying D., Fang Z. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: an overview // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. Vol. 19. No. 1. P. 218–246. DOI: 10.1111/1541-4337.12514.
2. Delgado E., Reyes-Jaquez D. Extruded aquaculture feed: a review // In book: *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products* // Ed. by Sayyad Z. Q. London: InTechOpen, 2018. P. 145–163. DOI: 10.5772/intechopen.69021.
3. Vasagam K. K., Ambasankar K., Dayal J. S. An overview of aquafeed formulation and processing // *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture*. 2015. P. 227–240. DOI: 10.1007/978-81-322-2271-2_21.
4. Adekola K. A. Engineering review food extrusion technology and its applications // *Journal of Food Science and Engineering*. 2016. Vol. 6. No. 3. P. 149–168. DOI: 10.17265/2159-5828/2016.03.005.
5. Singh B., Sharma C., Sharma S. Fundamentals of extrusion processing // In book: *Novel food processing technologies* // Ed. by Nanda V., Sharma S. New Delhi: New Indian Publishing Agency – NIPA, 2017. DOI: 10.31219/osf.io/xqa5n.
6. Singh P., Paul B. N., Giri S. S. Potentiality of new feed ingredients for aquaculture: a review // *Agricultural Reviews*. 2018. Vol. 39. No. 4. P. 282–291. DOI: 10.18805/ag.r-1819.
7. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review // *Communications of the Association for Information Systems*. 2015. Vol. 37. P. 879–910. DOI: 10.17705/1cais.03743.
8. Torraco R. J. Writing integrative literature reviews: using the past and present to explore the future // *Human Resource Development Review*. 2016. Vol. 15. No. 4. P. 404–428. DOI: 10.1177/1534484316671606.
9. Bordoloi R., Ganguly S. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters // *Indian Journal of Scientific Research and Technology*. 2014. Vol. 2. No. 1. P. 1–3. [Electronic resource]. Access point: <http://www.indjsrt.com> (reference's date 09.03.2021).
10. 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. Vol. 56. No. 3. P. 445–473. DOI: 10.1080/10408398.2013.779568.
11. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 59. No. 18. P. 2979–2998. DOI: 10.1080/10408398.2018.1480007.
12. Arevalo A. M., Ascheri J. L. R., de Oliveira E. M. S., Berrios J. D. J. Aquaculture feeds: a review of raw material, manufacturing process and product quality // *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 2018. Vol. 16. No. 3/4. P. 10–17. DOI: 10.1234/4.2018.5530.
13. Khater E. S. G., Bahnasawy A. H., Ali S. A. Physical and mechanical properties of fish feed pellets // *Journal of Food Processing & Technology*. 2014. Vol. 5. No. 10. P. 1–6. DOI: 10.4172/2157-7110.1000378.
14. Cian R. E., Bacchetta C., Cazenave J., Drago S. R. Optimization of single screw extrusion process for producing fish feeds based on vegetable meals and evaluation of nutritional effects using a juvenile *Piaractus mesopotamicus* model // *Animal Feed Science and Technology*. 2017. Vol. 234. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2017.09.004.
15. Bell J. G., Koppe W. Lipids in aquafeeds // Fish oil replacement and alternative lipid sources in aquaculture feeds. 2010. P. 21–59. DOI: 10.1201/9781439808634.
16. Tumuluru J. A case study on maximizing aqua feed pellet properties using response surface methodology and genetic algorithm // *British Journal of Applied Science & Technology*. 2013. Vol. 3. No. 3. P. 567–585. DOI: 10.9734/BJAST/2014/2985.
17. Singh S. K., Muthukumarappan K. Effect of feed moisture, extrusion temperature and screw speed on properties of soy white flakes based aquafeed: a response surface analysis // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015. Vol. 96. No. 6. P. 2220–2229. DOI: 10.1002/jsfa.7339.
18. Yousf N., Nazir F., Salim R., Ahsan H., Sirwal A. Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2017. Vol. 6. No. 6. P. 2165–2168. [Electronic resource]. Access point: <http://www.phytojournal.com/archives/2017/vol6issue6/PartAD/6-6-326-909.pdf> (reference's date 09.03.2021).

19. Rokey G. J., Plattner B., Souza E. M. D. Feed extrusion process description // Revista Brasileira de Zootecnia. 2010. Vol. 39. P. 510–518. DOI: 10.1590/S1516-35982010001300055.
20. Riaz M. N., Rokey G. J. Preconditioners in food and feed extrusion: common problems and their solutions // Extrusion Problems Solved. 2012. P. 64–78. DOI: 10.1533/9780857095206.64.
21. Thiébaud M., Dumay E., Cheftel J. C. Influence of process variables on the characteristics of a high moisture fish soy protein mix texturized by extrusion cooking // LWT – Food Science and Technology. 1996. Vol. 29. No. 5-6. P. 526–535. DOI: 10.1006/fstl.1996.0080.
22. Shukla C. Y., Muthukumarappan K., Julson J. L. Effect of single-screw extruder die temperature, amount of distillers' dried grains with solubles (DDGS), and initial moisture content on extrudates // Cereal Chemistry. 2005. Vol. 82. No. 1. P. 34–37. DOI: 10.1094/CC-82-0034.
23. Rodríguez-Miranda J., Gomez-Aldapa C. A., Castro-Rosas J., Ramírez-Wong B., Vivar-Vera M. A., Morales-Rosas I., Medrano-Roldan I., Delgado E. 2014. Effect of extrusion temperature, moisture content and screw speed on the functional properties of aquaculture balanced feed // Emirates Journal of Food and Agriculture. 2014. Vol. 26. No. 8. P. 659–671. DOI: 10.9755/ejfa.v26i8.17133.
24. Rodríguez-Miranda J., Ramírez-Wong B., Vivar-Vera M. A., Solís-Soto A., Gómez-Aldapa C. A., Castro-Rosas J., Medrano-Roldan H., Delgado-Licon E. Effect of bean flour concentration (*Phaseolus vulgaris* L.), moisture content and extrusion temperature on the functional properties of aquafeeds // Revista Mexicana de Ingeniera Química. 2014. Vol. 13. No. 3. P. 649–663. [Electronic resource]. Access point: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n3/v13n3a1.pdf> (reference's date 09.03.2021).
25. Ali S. S. R., Ambasankar K., Balachandran S., Ramachandran K. Effect of moisture and temperature on the extrudate properties of milkfish (*Chanos chanos*) feed // Indian Journal of Fisheries. 2019. Vol. 66. No. 4. P. 112–117. DOI: 10.21077/ijf.2019.66.4.75758-14.
26. Singh S. K., Muthukumarappan K. Effect of different extrusion processing parameters on physical properties of soy white flakes and high protein distillers dried grains-based extruded aquafeeds // Journal of Food Research. 2014. Vol. 3. No. 6. P. 107. DOI: 10.5539/jfr.v3n6p107.
27. Chevanan N., Rosentrater K.A., Muthukumarappan K. Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS // Food and Bioprocess Technology. 2010. Vol. 3. No. 1. P. 111–120. DOI: 10.1007/s11947-008-0065-y.
28. Plattner B. Density Management and Control // Extruders and expanders in pet food, aquatic and livestock feeds. 2007. P. 277–294. [Electronic resource]. Access point: <https://vk.cc/aCJKwB> (reference's date 09.03.2021).
29. Rosentrater K.A., Muthukumarappan K., Kannadhasan S. Effects of ingredients and extrusion parameters on properties of aquafeeds containing DDGS and corn starch // Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition. 2009. Vol. 1. No. 2. P. 44–60. [Electronic resource]. Access point: <http://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=239003> (reference's date 09.03.2021).
30. Chevanan N., Muthukumarappan K., Rosentrater K. A., Julson J. L. Effect of die dimensions on extrusion processing parameters and properties of DDG-based aquaculture feeds // Cereal Chemistry Journal. 2007. Vol. 84. No. 4. P. 389–398. DOI: 10.1094/CCHEM-84-4-0389.
31. Singh S. K. Understanding the effect of extrusion processing parameters on physical, nutritional and rheological properties of soy white flakes based aquafeed in a single screw extruder. USA: South Dakota State University, 2016. 253 p. [Electronic resource]. Access point: <https://openprairie.sdstate.edu/etd/956/> (reference's date 09.03.2021).
32. Riaz M. N., Rokey G. J. Impact of particle size and other ingredients on extruded foods and feeds // Extrusion Problems Solved. 2012. P. 55–63. DOI: 10.1533/9780857095206.55.
33. Rolfe L. A., Huff H. E., Hsieh. F. Effects of particle size and processing variables on the properties of an extruded catfish feed // Journal of Aquatic Food Product Technology. 2001. Vol. 10. No. 3. P. 21–34. DOI: 10.1300/J030v10n03_03.
34. Daniel N. A review on replacing fish meal in aqua feeds using plant protein sources // International Journal of Fisheries and Aquatic Studies. 2018. Vol. 6. No. 2. P. 164–179. [Electronic resource]. Access point: <https://vk.cc/bWvgr8> (reference's date 09.03.2021).
35. Ma X., Jin T., Yoo J. H., Kim M. H., Ryu G. H. Effects of plant ingredients on physicochemical properties of extruded fish feed // Food Engineering Progress. 2019. Vol. 23. No. 1. P. 1–6. DOI: 10.13050/foodengprog.2019.23.1.1.
36. Wang P., Fu Y., Wang L., Saleh A. S. M., Cao H., Xiao Z. Effect of enrichment with stabilized rice bran and extrusion process on gelatinization and retrogradation properties of rice starch // Stärke – Stärke. 2017. Vol. 69. No. 7-8. P. 1600201. DOI: 10.1002/star.201600201.
37. De la Rosa-Millán J., Heredia-Olea E., Perez-Carrillo E., Guajardo-Flores D., Serna-Saldívar S. O. Effect of decortication, germination and extrusion on physicochemical and in vitro protein and starch digestion characteristics of black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) // LWT – Food Science and Technology. 2019. Vol. 102. P. 330–337. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.12.039.
38. De Cruz C. R., Kamarudin M. S., Saad C. R., Ramezani-Fard E. Effects of extruder die temperature on the physical properties of extruded fish pellets containing taro and broken rice starch // Animal Feed Science and Technology. 2015. Vol. 199. P. 137–145. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2014.11.010.

39. Umar S., Kamarudin M. S., Ramezani-Fard E. Physical properties of extruded aquafeed with a combination of sago and tapioca starches at different moisture contents // *Animal Feed Science and Technology*. 2013. Vol. 183. No. 1-2. P. 51–55. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2013.03.009.
40. Cian R. E., Bacchetta C., Cazenave J., Drago S. R. Optimization of single screw extrusion process for producing fish feeds based on vegetable meals and evaluation of nutritional effects using a juvenile *Piaractus mesopotamicus* model // *Animal Feed Science and Technology*. 2017. Vol. 234. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2017.09.004.
41. Solomon S. G., Ataguba G. A., Abeje A. Water stability and floatation test of fish pellets using local starch sources and yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) // *International Journal of Latest Trends in Agriculture & Food Sciences*. 2011. Vol. 1. No. 1. P. 1–5. [Electronic resource]. Access point: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.656.7316> (reference's date 09.03.2021).
42. Lin S., Huff H. E., Hsieh F. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog // *Journal of Food Science*. 2002. Vol. 67. No. 3. P. 1066–1072. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb09454.x.
43. Samuelsen T. A., Mjøs S. A., Oterhals A. Impact of variability in fishmeal physicochemical properties on the extrusion process, starch gelatinization and pellet durability and hardness // *Animal Feed Science and Technology*. 2013. Vol. 179. No. 1-4. P. 77–84. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2012.10.009.
44. Ayadi F. Y., Rosentrater K. A., Muthukumarappan K. Alternative protein sources for aquaculture feeds // *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 1–26. DOI: 10.3923/joafsnu.2012.1.26.
45. Lock E. J., Biancarosa I., Gasco L. Insects as raw materials in compound feed for aquaculture // *Edible Insects in Sustainable Food Systems*. 2018. P. 263–276. DOI: 10.1007/978-3-319-74011-9_16.
46. 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 domestica*) meals // *Journal of Insects as Food and Feed*. 2018. Vol. 4. No. 1. P. 19–30. DOI: 10.3920/jiff2017.0008.
47. 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 domestica* and *Hermetia illucens* fractions // *Journal of Insects as Food and Feed*. 2018. Vol. 4. No. 4. P. 275–284. DOI: 10.3920/jiff2017.0089.
48. Irungu F. G., Mutungi C. M., Faraj A. K., Affognon H., Tanga C., Ekesi S., Nakimbugwe D., Fiaboe K. K. M. Minerals content of extruded fish feeds containing cricket (*Acheta domestica*) and black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) fractions // *International Aquatic Research*. 2018. Vol. 10. No. 2. P. 101–113. DOI: 10.1007/s40071-018-0191-8.
49. Ottoboni M., Spranghers 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. Vol. 17. No. 2. P. 418–427. DOI: 10.1080/1828051x.2017.1372698.
50. 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. Vol. 259. P. 44–51. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.04.021.
51. Weththasinghe P., Hansen J. Ø., Nøklund D., Lagos L., Rawski M., Øverland M. Full-fat black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) meal and paste in extruded diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*): effect on physical pellet quality, nutrient digestibility, nutrient utilization and growth performances // *Aquaculture*. 2021. Vol. 530. P. 735–785. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.735785.

UDC 631.363.285:636.085.55:639.3.043

Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Khlystunov V. F.

AQUAFEED EXTRUSION (REVIEW)

Summary. *Extrusion is one of the most important technological operations in aquafeed production. Indeed, the digestibility of feed nutrients considerably increases as a result of extrusion. The review deals with the issues of vegetable and animal raw materials processing for aquafeed production through extrusion. The analysis of scientific publications discussing the monitoring subject showed that extrusion of multicomponent mixtures (compound feed) had been studied insufficiently. Research objectives were to generalize and analyze English-language scientific publications containing information on the technologies of compound fish feed extrusion, to clarify the information on the rational parameters of their implementation and the effects on the properties of finished extruded*

feed. Search, selection, as well as systematic review of highly cited English-language scientific articles on the research subject for the period 2000–2020, were carried out. In the course of the analysis of literary sources, it was detected that the properties of the finished extruded feed were mostly affected by the extrusion temperature, raw material moisture and screw speed. The regularities of changes in the properties of ready-extruded feed granules, as a result of changes in extrusion parameters, have been determined. The results of the analyzed scientific articles made it possible to establish the peculiarities of the extrusion of compound feed for aquaculture based on plant raw materials, in particular starch. We defined the regularities of compound fish feed extrusion containing raw materials with a considerable amount of protein of animal origin, in particular its new type: insects' biomass. This new type of protein-containing raw materials of animal origin can successfully replace expensive fish meal in the fish feed composition. The essential factor, limiting the application of animal raw materials in fish feed, in particular insects, is its moisture, which should not exceed 30% so that the extrusion process was fully effective. Reducing the feed mixture moisture is possible when combining various types of animal and plant raw materials with high and low moisture. This will ensure the acceptable moisture of the mixture and get the high-quality extruded feed. Aquafeed extrusion is a promising trend. However, it requires additional research to determine the parameters of the extrusion process common to all types of both plant and animal raw materials and their mixtures.

Keywords: *feed, aquafeed, fish feed, extruded feed, extrusion, extrudate, processing parameters, properties of extrudate.*

Брагинец Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, структурное подразделение «СКНИИМЭСХ», ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»; 347740, Россия, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: sbraginet@mail.ru.

Бахчевников Олег Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, структурное подразделение «СКНИИМЭСХ», ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»; 347740, Россия, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: oleg-b@list.ru.

Хлыстунов Виктор Федорович, доктор технических наук, ученый секретарь по механизации и электрификации, ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”»; 347740, Россия, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14; e-mail: vniptim@gmail.com.

Braginets Sergey Valerievich, Cand. Sc. (Tech.), leading researcher of the Department of vegetable feedstock processing, structural unit SKNIIMESH, SSE “Agricultural research center «Donskoy»”; 14, Lenina str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: braginet@mail.ru.

Bakhchevnikov Oleg Nikolayevich, Cand. Sc. (Tech.), researcher of the Department of vegetable feedstock processing, structural unit SKNIIMESH, SSE “Agricultural research center «Donskoy»”; 14, Lenina str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: oleg-b@list.ru.

Khlystunov Viktor Fedorovich, Dr. Sc. (Tech.), Academic secretary on mechanization and electrification, SSE “Agricultural research center «Donskoy»”; 14, Lenina str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia; e-mail: vniptim@gmail.com.

Дата поступления в редакцию – 18.01.2021.

Дата принятия к печати – 05.03.2021.