



ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕОБМОЛОЧЕННЫХ КОЛОСЬЕВ ПШЕНИЦЫ РАННИХ ФАЗ СПЕЛОСТИ В КОРМ ДЛЯ РЫБ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

О.Н. Бахчевников, кандидат технических наук; oleg-b@list.ru

С.В. Брагинец, доктор технических наук; sbraginet@mail.ru

К.А. Деев, аспирант; prosto.deev@yandex.ru

Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград

Г.М. Татарников, аспирант; grigoriy_tatarnikov@mail.ru

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Реферат. Необмолоченные колосья зерновых культур ранних фаз созревания могут быть использованы как сырье для приготовления корма. Цель исследования: разработка и обоснование технологии переработки необмолоченных колосьев ранних фаз спелости в корм для всеядных рыб. Объектом исследования являлся технологический процесс приготовления гранулированного корма из необмолоченных колосьев ранних фаз спелости. Была разработана предварительная технологическая схема приготовления гранулированного корма из колосьев. Опытная проверка выявила недостатки в реализации технологического процесса производства корма из необмолоченных колосьев, снижающие его энергетическую и экономическую эффективность и негативно сказывающиеся на производительности технологической линии и качестве корма. Были разработаны возможные способы их решения. Для эффективной реализации технологии производства гранулированного корма из колосьев ранних фаз созревания необходимо совместить выполнение технологических операций сушки и измельчения сырья, а также его измельчения и смешивания, для чего предложены новые технологические решения. Была разработана усовершенствованная технологическая схема производства гранулированного корма для рыб из необмолоченных колосьев ранних сроков созревания, включающая совмещенные технологические операции. В новую схему интегрированы подлежащие разработке и уже разработанные новые технические средства. Результаты исследования показывают, что технология производства гранулированного корма из необмолоченных колосьев является эффективным средством повышения рентабельности производства продукции животноводства, так как произведенный по этой технологии корм содержит большее количество протеина, чем традиционный корм на основе обмолоченного фуражного зерна, вследствие чего в его состав можно включать меньшее количество дорогостоящих белковых добавок. Внедрение новой технологии приготовления гранулированного корма для рыб из необмолоченных колосьев позволит использовать раннюю уборку зерновых культур способом очеса для увеличения питательной ценности кормов.

Ключевые слова: зерновые культуры, колосья, фазы спелости, технология производства, сушка, измельчение, смешивание, гранулирование.

Для цитирования: Технология переработки необмолоченных колосьев пшеницы ранних фаз спелости в корм для рыб: проблемы и решения / О.Н. Бахчевников и др. // Техника и технологии в животноводстве. 2024. № 3. С. 28-35. EDN TCODDR



TECHNOLOGY OF NON-THRESHED EARS OF WHEAT OF EARLY STAGES OF RIPENESS INTO FISH FOOD PROCESSING: PROBLEMS AND SOLUTIONS

O.N. Bachevnikov, candidate of technical sciences

S.V. Braginet, doctor of technical sciences

K.A. Deev, post-graduate student

Agrarian research center "Donskoy", Zernograd,

G.M. Tatarnikov, post-graduate student

Don state technical university, Rostov-on-Don

Abstract. The grain crops' non-threshed ears of the early stages of ripeness as raw materials for feed preparation can be used. The purpose of this study was: non-threshed ears of early ripeness phases into food for omnivorous fish processing technology developing and substantiating. This study object – was the technological process of granulated feed from non-threshed ears of early ripeness phases preparing. A preliminary technological scheme for granular feed preparation from ears had been developed. An experimental test had revealed shortcomings in technological process of

feed from non-threshed ears producing implementation, reducing its energy and economic efficiency and the processing line's productivity and feed quality's negative affecting. Possible solutions had been developed. For granular feed production from early ripening phases ears technology effective implementation, it is necessary the raw materials' drying and grinding as technological operations, as well as its grinding and mixing to combine, for which new technological solutions were proposed. An improved technological scheme for granular fish feed from non-threshed ears of early ripening producing has been developed, including combined technological operations. New technical means to be developed and already developed into the new scheme are integrated. The results of the study had shown that the technology of granulated feed from non-threshed ears producing – is an effective means of livestock production's profitability increasing, since feed produced by this technology using contains more protein than traditional one based on threshed forage grains, as a result fewer expensive protein additives in its composition can be included. The introduction of a new technology for the granular fish feed from non-threshed ears preparation will make it possible early grain crops harvesting by the oches-method using for the feed nutritional value increasing.

Keywords: grain culture, ears, phases of ripeness, producing technology, drying, grinding, mixing, granulation.

For citation: Technology of non-threshed ears of wheat of early stages of ripeness into fish food processing: problems and solutions / O.N. Bakhchevnikov et al. // Machinery and technologies in livestock. 2024. No. 3. P. 28-35. EDN TCODDR

Введение. В аквакультуре при разведении всеядных прудовых рыб, в частности, карпа, корма готовят в основном из фуражного зерна [1]. Но большинство зерновых культур имеет низкое содержание протеина и незаменимых аминокислот (таблица 1), что приходится компенсировать использованием дорогостоящих белковых добавок [2].

Повысить питательную ценность корма из зерна пшеницы и ячменя возможно, убирая его до наступления полной спелости. Известно, что максимальное содержание в зерне протеина приходится на фазу восковой, а не полной спелости [3, 4]. Использование в составе корма не только зерна, но и незерновой части колоса позволит дополнительно увеличить содержание в нем питательных веществ [5] (таблица 2).

Таблица 1. Содержание протеина в фуражном зерне и в «идеальном» корме для карпа

Содержание протеина, %	Пшеница	Ячмень	Кукуруза	«Идеальный» корм
	10-12	9-11	9-12	30

Таблица 2. Состав необмолоченного зернового вороха озимой пшеницы (фаза начала восковой спелости)

Фракция	Доля, %
Листья и стебли	1,38
Незерновая часть колоса	54,66
Чистое зерно	15,5
Зерно в пленках	28,46

Как видно из представленных в таблице 2 данных, уборка колосьев пшеницы без уда-

ления незерновой части позволит почти в два раза увеличить количество получаемого с той же площади сырья для кормов. Возможность качественной уборки имеющих высокую влажность колосьев ранних фаз спелости создало применение новых очесывающих жаток [6]. Способ уборки очесом заключается в том, что жатка «счесывает» колосья с содержащимися в них зернами со стеблей [7].

Собранное зерно и незерновую часть колоса (зерновой ворох) не обмолачивают, а используют для приготовления корма. Зерновой ворох по причине его высокой влажности (40-60%) не подлежит длительному хранению, поэтому к его переработке на корм следует приступать незамедлительно. Высокая влажность также затрудняет его переработку, в связи с этим решение задачи ее снижения является важным элементом разрабатываемой технологии приготовления корма.

Цель исследования: разработка и обоснование технологии переработки необмолоченных колосьев ранних фаз спелости в корм для всеядных рыб.

Материалы и методы. Исследования были выполнены в Аграрном научном центре «Донской» (Ростовская область, Россия). Объект исследования – технологический процесс приготовления гранулированного корма из необмолоченных колосьев пшеницы ранних фаз спелости. В результате уборки колосьев озимой пшеницы ранней спело-

сти очесывающей жаткой был получен необмолоченный зерновой ворох – смесь зерна и незерновой части колоса, на основе которой приготовили гранулированный корм. Корм предназначен для кормления взрослого карпа (*Cyprinus carpio* L.).

Метод исследования технологического процесса – системный анализ и синтез. Процесс анализа и синтеза был представлен графически в виде машинно-аппаратных схем технологического процесса, включающих технологические операции и машины для их выполнения [8]. Был выполнен системный анализ технологического процесса [9] производства корма из необмолоченных колосьев пшеницы, включающего технологические традиции, определены достоинства и недостатки. Выполнен синтез новой рациональной технологической схемы приготовления корма из необмолоченных колосьев, в которой были устранены выявленные недостатки. Недостатки устраняли путем объединения или изменения технологических операций и включения в машинно-аппаратную схему новых технических средств.

Результаты исследования и обсуждение. Для проверки практической возможности производства корма для рыб из необмолоченных колосьев пшеницы ранней спелости и выявления возможных проблем, препятствующих этому, были разработаны предварительная технологическая схема приготовления гранулированного корма из колосьев (рис. 1) и реализующая ее технологическая линия (рис. 2).

В ходе реализации предложенной технологической схемы зерновой ворох обрабатывают при температуре 30-40°C для повышения однородности сырья (зерно и незерновая часть колоса) в экспандере или экструдере, после чего нормализованный ворох, имеющий влажность 40-60%, подвергают сушке в барабанной или конвективной сушилке до достижения влажности 14-18%. Высушенный ворох измельчают в молотковой дробилке, смешивают с белковыми и минеральными добавками (3-7% от массы корма) в горизонтальном смесителе, после чего гранулируют в пресс-грануляторе.

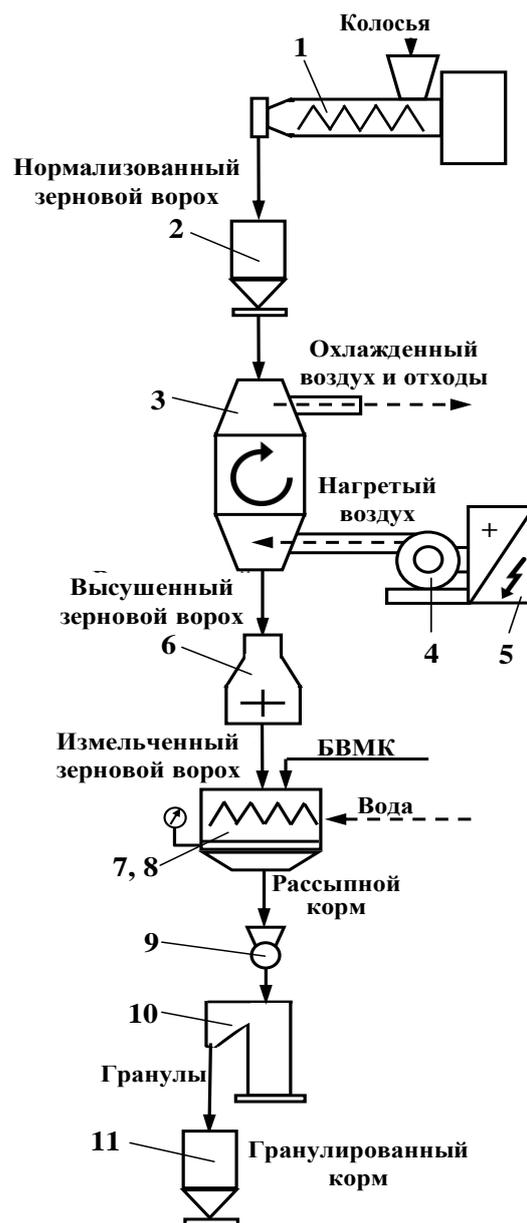


Рис. 1. Машинно-аппаратная схема приготовления гранулированного корма из необмолоченных колосьев и добавок: 1 – экструдер; 2 – оперативный бункер для сырья; 3 – конвективная сушильная установка; 4 – вентилятор; 5 – нагреватель; 6 – молотковая дробилка; 7 – горизонтальный смеситель; 8 – весовой дозатор; 9 – объемный дозатор; 10 – гранулятор; 11 – бункер для готового корма

В 2023 г. была проведена проверка предложенной технологии производства гранулированного корма из необмолоченных колосьев пшеницы и реализующей его технологической линии. Из зернового вороха озимой пшеницы ранней восковой спелости и белково-минеральных добавок был произведен гранулированный корм для карпа.

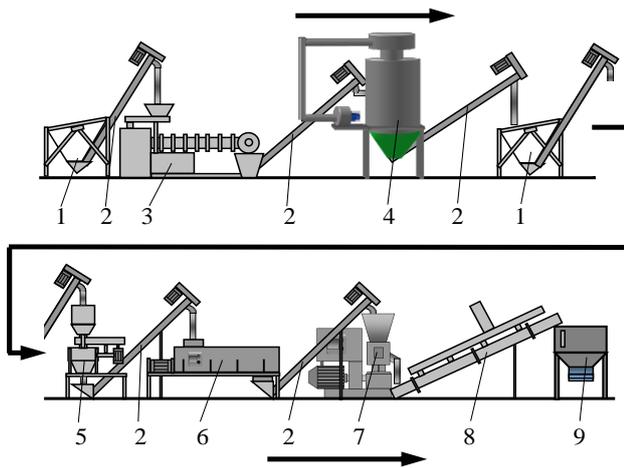


Рис. 2. Схема расположения оборудования технологической линии приготовления гранулированного корма из необмолоченных колосьев: 1 – бункер-накопитель для сырья; 2 – шнековый транспортер; 3 – экструдер; 4 – конвективная сушильная установка; 5 – молотковая дробилка; 6 – горизонтальный смеситель; 7 – пресс-гранулятор; 8 – скребковый транспортер; 9 – бункер-накопитель для готового корма

Опытная проверка показала, что в результате реализации предложенной технологической схемы из зернового вороха был произведен гранулированный корм для рыб хорошего качества и высокой питательной ценности, соответствующий требованиям. Данная технологическая схема хорошо подходит для небольших сельхозпредприятий.

Но опытная проверка выявила и недостатки в реализации технологического процесса производства корма из необмолоченных колосьев, снижающие его энергетическую и экономическую эффективность и негативно сказывающиеся на производительности технологической линии и качестве корма (таблица 3). Были разработаны возможные способы их решения. Первой из выявленных проблем является недостаточная эффективность используемых для сушки влажного сырья технических средств, а особенно барабанных сушилок.

Таблица 3. Проблемы технологии производства гранулированного корма из необмолоченных колосьев и добавок и возможные пути их решения

Проблема	Решение
Неэффективное измельчение влажного зернового вороха молотковой дробилкой	Использование измельчителей другой конструкции, двухэтапное смешивание
Неэффективная сушка влажного зернового вороха традиционными сушилками	Совмещение процессов измельчения и конвективной сушки зернового вороха, использование в технологическом процессе вихревой сушилки
Неэффективное смешивание влажного зернового вороха с добавками, образование конгломератов в смесителе	Совмещение процессов смешивания зернового вороха с добавками и его измельчения в одной машине, использование в технологическом процессе смесителя-измельчителя
Невозможность производства гранул малого диаметра для кормления мальков рыб	Включение в технологическую схему корзинного гранулятора для приготовления гранул малого диаметра

Интенсифицировать процесс удаления влаги из зернового вороха позволяет использование конвективной сушки сырья, которая и была реализована в предложенной технологической схеме. Но опытная проверка показала, что конвективный способ сушки также является недостаточно эффективным. Причиной этого является то, что обработанный в экспандере или экструдере нормализованный зерновой ворох представляет собой отрезки жгута длиной 70-80 мм и диаметром 20-30 мм. В таком виде эффективно высушены могут быть лишь внешние слои частиц вороха, в то время как их внутренние слои остаются достаточно влажными. Измельчить же их до меньших размеров до

сушки сложно, так как сырье из необмолоченных колосьев ранней спелости представляет собой влажную и вязкую массу.

По причине повышенной вязкости внутренних слоев частиц зернового вороха под действием рабочих органов молотковой дробилки происходит их смятие и уплотнение, а также налипание материала на молотки, что снижает эффективность измельчения. Использование дискового измельчителя для измельчения влажного сырья также неэффективно.

Наилучшим способом решения этой проблемы с точки зрения энергоэффективности и металлоемкости является совмещение процессов измельчения и конвективной сушки

влажного сырья в одной технологической операции. Такую возможность дает использование вихревых сушилок [10]. В вихревой сушилке мелкие частицы сырья пребывают в сушильной камере небольшой промежуток времени, достаточный для сушки, в то время как крупные находятся в ней длительное время, дополнительно подвергаясь измельчению [11]. Поэтому в усовершенствованную технологическую схему приготовления корма из колосьев необходимо включить вихревую конвективную сушилку со встроенным роторным измельчителем для сушки и одновременного измельчения влажного зернового вороха ранних сроков уборки.

Согласно технологической схеме (рис. 1), измельченный и высушенный зерновой ворох необходимо смешать с белковыми и минеральными добавками, чтобы получить полноценный корм. Обычно для этого применяют смесители, в которых размещен горизонтальный вал со смешивающими рабочими органами, например, лопастями либо шнеком, перемешивающими сырье при вращении вала [12].

Недостатком традиционных горизонтальных смесителей является то, что если в состав смеси входит влажное растительное сырье высокой вязкости (таким является зерновой ворох ранних фаз спелости), то в процессе смешивания происходит соединение его частиц и образование агломератов, налипание сырья на рабочие органы, что приводит к значительной неоднородности получаемой смеси [13].

Для приготовления кормовой смеси, включающей зерновой ворох, рационально использовать смеситель-измельчитель, в котором совмещено выполнение операций измельчения и смешивания. Такой смеситель включает размещенные на горизонтальном валу смешивающие и измельчающие рабочие органы. Это обеспечивает разрушение образовавшихся в процессе смешивания агломератов и повышение однородности корма (патенты RU 43788, RU 145601).

Недостатком существующих моделей смесителей-измельчителей является то, что смешивающие и измельчающие рабочие органы размещены на их валу двумя раздель-

ными группами таким образом, что загруженные в корпус материалы, перемещаясь вдоль вала, вначале подвергаются смешиванию, а затем измельчению, после чего готовая смесь выгружается. Кроме того, измельчающие рабочие органы размещены на значительно меньшей части длины вала, чем смешивающие. При такой конструкции смесителя-измельчителя в процессе смешивания влажного вязкого сырья происходит соединение частиц, образуются агломераты, затрудняющие его осуществление, что снижает производительность машины, так как часть уже разделенных и перемешанных частиц сырья вновь соединяется между собой.

Для того, чтобы устранить описанные недостатки смесителей-измельчителей, необходимо обеспечить одновременное смешивание и измельчение влажного вязкого сырья, что может быть достигнуто путем попеременного размещения в равном количестве элементов смесительного и режущего механизмов на валу корпуса смесителя-измельчителя. Поэтому для усовершенствованной технологической схемы приготовления корма из колосьев необходимо разработать смеситель-измельчитель согласно предложенной схеме (рис. 3).

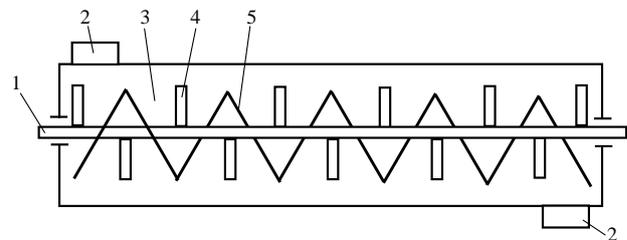


Рис. 3. Предлагаемая схема конструкции смесителя-измельчителя: 1 – вал; 2 – загрузочные и выходные отверстия; 3 – корпус; 4 – измельчающие рабочие органы; 5 – смешивающие рабочие органы

Предложенный смеситель-измельчитель будет эффективен и при приготовлении гранулированного корма для мальков рыб, т. к. при этом кормовая смесь увлажняется до 25-40%, что делает затруднительным ее приготовление в обычном горизонтальном смесителе. Использование предложенных технических средств позволит эффективно осуществлять измельчение зернового вороха, которое будет двухстадийным: первый этап – из-

мельчение влажного вороха в смесителе-измельчителе после нормализации до размера частиц 5-10 мм, второй этап – измельчение в вихревой сушилке до размера частиц 2-4 мм.

Так как входящий в состав имеющейся технологической линии пресс-гранулятор с горизонтальной матрицей обеспечивает производство гранул большого диаметра для питания взрослых рыб, то для гранулирования кормового сырья влажностью 25-40% и получения гранул малого диаметра (0,5-2 мм) для питания мальков рыб предложено новое техническое решение – корзинный гранулятор, защищенный патентом RU 218265 (рис. 4) [14]. Особенность его конструкции состоит в том, что в перфорированной корзине соосно размещены рассекатели, перемешивающие и измельчающие сырье, и экструзионные лопасти, уплотняющие сырье и продавливающие его через фильтры корзины.

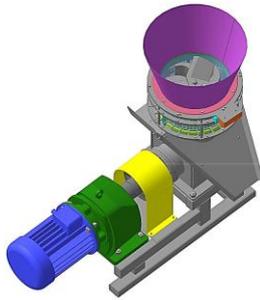


Рис. 4. Корзинный гранулятор (патент RU 218265)

Применение корзинного гранулятора и смесителя-измельчителя позволяет использовать две ветви технологического процесса приготовления гранулированного корма из зернового вороха и добавок: для взрослых рыб – их смешивание в обычном смесителе и гранулирование в пресс-грануляторе, а для мальков – смешивание сырья с одновременным увлажнением в смесителе-измельчителе и гранулирование в корзинном грануляторе.

С учетом всего вышеизложенного была разработана усовершенствованная технологическая схема производства гранулированного корма для рыб (рис. 5) из необмолоченного зернового вороха ранних сроков созревания, в которой изменен порядок выполнения технологических операций, а часть из них совмещены. В новую схему интегрированы подлежащие разработке и уже разрабо-

танные новые технические средства, описанные выше.

Согласно новой технологической схеме, зерновой ворох нормализуют для повышения однородности в экспандере или экструдере при температуре 30-40°C, после чего нормализованный ворох, имеющий влажность 40-60%, поступает в смеситель-измельчитель, где измельчается до размера частиц 5-10 мм и дополнительно перемешивается. После этого он высушивается до влажности 10-14% в вихревой сушилке и одновременно измельчается до размера частиц 2-4 мм.

Обработанный зерновой ворох направляется по одному из двух ответвлений технологического процесса: приготовление гранулированного корма для взрослых рыб либо мальков.

Гранулированный корм для взрослых рыб получают, смешивая зерновой ворох с белково-минеральными добавками в обычном горизонтальном смесителе, после чего смесь гранулируют в пресс-грануляторе с плоской матрицей. Гранулированный корм для мальков получают, увлажняя зерновой ворох до влажности 35-40% и смешивая его с белково-минеральными добавками в смесителе-измельчителе, после чего смесь гранулируют в корзинном грануляторе.

Технология производства гранулированного корма из необмолоченных колосьев является эффективным средством повышения рентабельности производства продукции животноводства, так как произведенный по этой технологии корм содержит большее количество протеина, чем традиционный корм на основе обмолоченного фуражного зерна, вследствие чего в его состав можно включать меньшее количество дорогостоящих белковых добавок.

Выводы. Опытная проверка показала, что в результате реализации технологической схемы из необмолоченных колосьев пшеницы был произведен гранулированный корм хорошего качества и высокой питательной ценности, соответствующий требованиям. Но проверка выявила недостатки в реализации технологического процесса производства корма из необмолоченных колосьев, снижающие его энергетическую и экономическую эффективность.

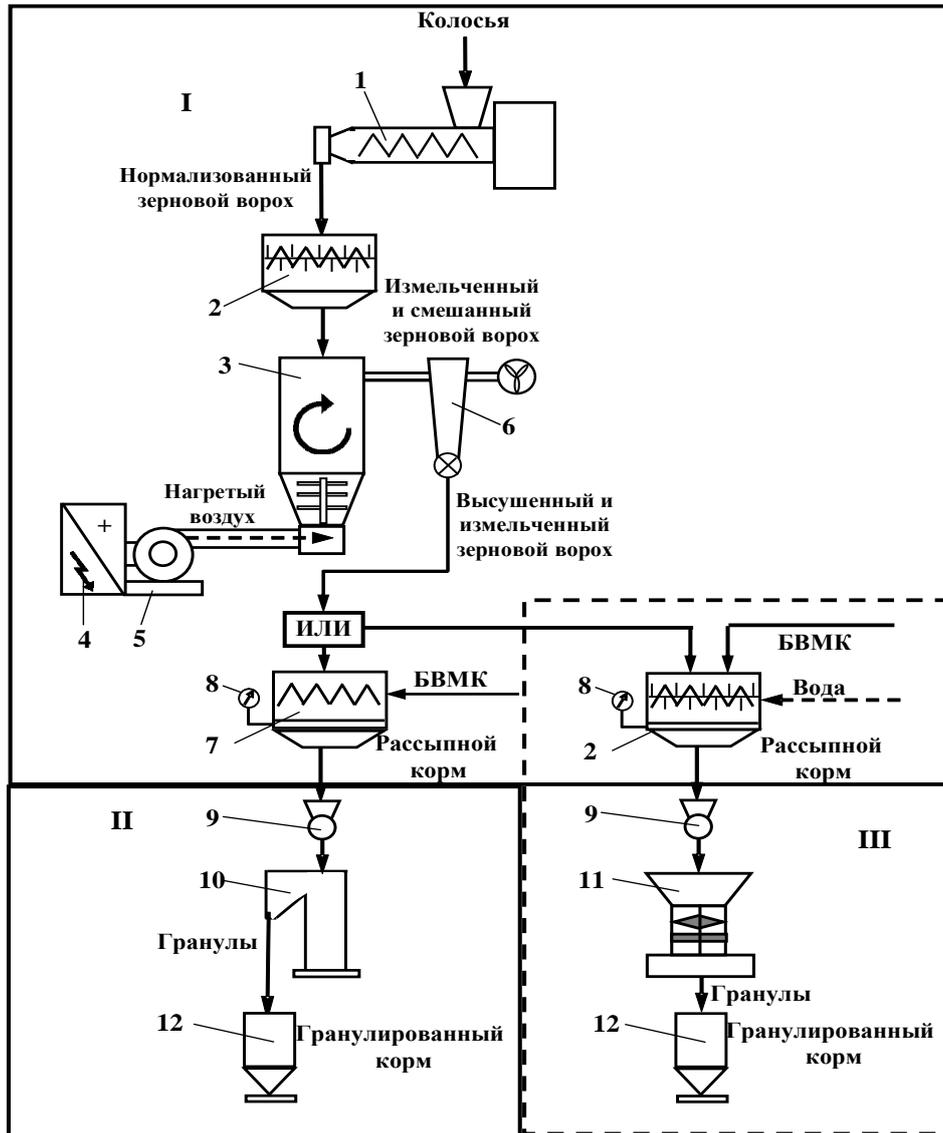


Рис. 5. Машинно-аппаратная схема приготовления гранулированного корма из необмолоченных колосьев и добавок (усовершенствованная):

I – блок переработки колосьев; II – блок гранулирования корма; III – ответвление технологического процесса для производства корма для мальков; 1 – экструдер; 2 – смеситель-измельчитель; 3 – сушильная установка (конвективная) со встроенным измельчителем; 4 – электрокалорифер; 5 – вентилятор; 6 – сепаратор; 7 – горизонтальный смеситель; 8 – весовой дозатор; 9 – объемный дозатор; 10 – пресс-гранулятор; 11 – корзинный гранулятор; 12 – бункер для готового корма

Установлено, что для эффективной реализации технологии производства гранулированного корма для рыб из необмолоченных колосьев ранних фаз созревания и добавок необходимо совместить выполнение технологических операций сушки и измельчения растительного сырья, а также его измельчения и смешивания. Для реализации совмещения технологических операций предложены новые технические решения.

Была разработана усовершенствованная технологическая схема производства грану-

лированного корма для рыб из необмолоченных колосьев ранних сроков созревания, в которой изменен порядок выполнения технологических операций, а часть из них совмещены. В новую схему интегрированы подлежащие разработке и уже разработанные новые технические средства.

Результаты исследования показывают, что технология производства гранулированного корма из необмолоченных колосьев является эффективным средством повышения рентабельности производства продукции

животноводства, так как произведенный по этой технологии корм содержит большее количество протеина, чем традиционный корм на основе обмолоченного фуражного зерна, вследствие чего в его состав можно включать меньшее количество дорогостоящих белковых добавок. Внедрение новой технологии приготовления гранулированного корма для рыб из необмолоченных колосьев позволит использовать раннюю уборку зерновых культур способом очеса для увеличения питательной ценности кормов для рыб.

Литература:

1. Degani G., Yehuda Y., Viola S. The digestibility of nutrient sources for common carp, *Cyprinus carpio* Linnaeus // *Aquaculture Research*. 1997. V. 28, № 8. P. 575-580.
2. Shewry P.R. Improving the protein content and composition of cereal grain // *Journal of Cereal Science*. 2007. V. 46, № 3. P. 239-250.
3. Early Wheat harvest influenced grain quality and profit but not yield / D.S. Alt et al. // *Crop, Forage & Turfgrass Management*. 2019. V. 5, № 1. P. 1-6.
4. Vollmer E., Musshoff O. Average protein content and its variability in winter wheat: A forecast model based on weather parameters // *Earth Interactions*. 2018. V. 22, № 19. P. 1-24.
5. Astanakulov K. Wheat ripening dynamics in Uzbekistan for harvesting it in earlier periods // *E3S Web of Conferences*. 2021. V. 264. P. 04074.
6. Review and analysis of technologies for harvesting perennial grain crops / D.V. Rudoy et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 937. P. 022112.
7. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies // *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. V. 59, № 3. P. 27-32.
8. Wasson C.S. System engineering analysis, design, and development: Concepts, principles, and practices, 2nd Edition. New York, 2015. 880 p.
9. Martin J.N. Systems engineering guidebook: A process for developing systems and products. CRC Press, 2020. 304 p.
10. CFD modeling of heat transfer and flow field in spin flash drying process / Y. Yuan et al. // *Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 56, № 5. P. 3011-3021.
11. Dorfeshan M., Mehrzad S. Pneumatic and Flash Drying // *Particulate Drying*. CRC Press, 2023. C. 47-61.
12. CFD modelling of powder flow in a continuous horizontal mixer / M.H. Biroun et al. // *Powder Technology*. 2023. V. 428. P. 118843.
13. Laurent B.F.C., Bridgwater J., Parker D.J. Convection and segregation in a horizontal mixer // *Powder Technology*. 2002. V. 123. P. 9-18.
14. Performance comparison of dome and basket extrusion granulation / S.R. Zukowski et al. // *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. V. 160. P. 190-198.

Literature:

1. Degani G., Yehuda Y., Viola S. The digestibility of nutrient sources for common carp, *Cyprinus carpio* Linnaeus // *Aquaculture research*. 1997. V.28, № 8. P. 575-580.
2. Shewry P.R. Improving the protein content and composition of cereal grain // *Journal of cereal science*. 2007. V. 46, № 3. P. 239-250.
3. Early Wheat harvest influenced grain quality and profit but not yield / D.S. Alt et al. // *Crop, forage & turf grass management*. 2019. V. 5, № 1. P. 1-6.
4. Vollmer E., Musshoff O. Average protein content and its variability in winter wheat: a forecast model based on weather parameters // *Earth interaction*. 2018. V. 22, № 19. P. 1-24.
5. Astanakulov K. Wheat ripening dynamics in Uzbekistan for harvesting it in earlier periods // *E3S Web of conferences*. 2021. V. 264. P. 04074.
6. Review and analysis of technologies for harvesting perennial grain crops / D.V. Rudoy et al. // *IOP conference series: Earth and environmental science*. 2021. V. 937. P. 022112.
7. Buryanov A.I., Chervyakov I.V. Using combines for cleaning grain crops by non-traditional technologies // *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. V. 59, № 3. P. 27-32.
8. Wasson C.S. System engineering analysis, design, and development: Concepts, principles, and practices, 2nd Edition. New York, 2015. 880 p.
9. Martin J.N. Systems engineering guidebook: A process for developing systems and products. CRC Press, 2020. 304 p.
10. CFD modeling of heat transfer and flow field in spin flash drying process / Y. Yuan et al. // *Heat and mass transfer*. 2020. V. 56, № 5. P. 3011-3021.
11. Dorfeshan M., Mehrzad S. Pneumatic and Flash Drying // *Particulate Drying*. CRC Press, 2023. C. 47-61.
12. CFD modelling of powder flow in a continuous horizontal mixer / M.H. Biroun et al. // *Powder technology*. 2023. V. 428. P. 118843.
13. Laurent B.F.C., Bridgwater J., Parker D.J. Convection and segregation in a horizontal mixer // *Powder Technology*. 2002. V. 123. P. 9-18.
14. Performance comparison of dome and basket extrusion granulation / S.R. Zukowski et al. // *Chemical engineering research and design*. 2020. V. 160. P. 190-198.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. **Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**