

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

УДК 636.085.64

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201903.428-442



Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов

В. И. Сыроватка¹, Н. В. Жданова¹, А. Н. Рассказов^{1*},
Д. И. Торопов²

¹ИМЖ – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Россия)

²Постоянное представительство Республики Мордовия при Президенте Российской Федерации (г. Москва, Россия)

*vniimzh@mail.ru

Введение. В статье обоснована необходимость высокотемпературной обработки ингредиентов комбикормов. Рассмотрены принципы работы и конструктивные особенности применяемых способов и оборудования для кормопроизводства. Проанализированы фазовые переходы, достоинства и выделены ключевые энергетические, технологические и технические недостатки. Целью исследования является обоснование возможности создания поточной линии тепловой обработки комбикормов путем применения тепловых затворов, обеспечивающих непрерывную загрузку сырья в реактор и выгрузку обработанных кормов при высоком давлении и температуре.

Материалы и методы. Предложено перевести процесс баротермической обработки в более высокую зону фазовой диаграммы системы p, t (давление и температура). Это участок зоны перегретого пара с параметрами температуры 300–374 °С, давления 12–21 МПа и экспозицией обработки 30–60 секунд, что заменяет высокочрезмерные процессы нормализации, экспандирования, экструдирования и гранулирования. Показано изменение энтальпии H в диапазоне P от 0 до 21 МПа и t от 0 до 600 °С. Тепловые режимы представлены в аналитических зависимостях (формулах), которые являются базовыми условиями применения цифровых технологий.

Результаты исследования. Предложено конструктивное исполнение реактора с тепловым затвором на загрузке и выгрузке, который является базовым агрегатом поточной линии тепловой обработки комбикормов. Результаты исследования являются основополагающими для разработки проекта и образца поточной малоёмкостной линии.

Обсуждение и заключение. Переход процесса баротермической обработки комбикормов в зону перегретого пара позволяет осуществить перевод плохо усвояемых элементов зерновых и бобовых в легкоусвояемые, очистить корма от патогенных бактерий. К преимуществам реактора и линии относятся простота конструкции, экономия энергии и возможность реализации перспективных цифровых технологий.

© Сыроватка В. И., Жданова Н. В., Рассказов А. Н., Торопов Д. И., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: баротермическая обработка комбикормов, фазовые переходы, реактор, поточная линия

Для цитирования: Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов / В. И. Сыроватка [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 428–442. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.428-442>

Barothermal Processing of Animal Feed Ingredients

V. I. Syrovatka¹, N. V. Zhdanova¹, A. N. Rasskazov^{1*},
D. I. Toropov²

¹*Institute of Livestock Mechanization – Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)*

²*Permanent Mission of the Republic of Mordovia to the President of the Russian Federation (Moscow, Russia)*

*vniimzh@mail.ru

Introduction. The article substantiates the need for high-temperature processing of feed ingredients. Principles of operation and design features of the applied methods and equipment for feed production are considered. Phase transitions, along with advantages and energy, technological, and technical drawbacks are highlighted. The aim of the study is to justify a possibility of creating high-efficiency production lines using heat treatment of feeds by application of heat valves ensuring continuous loading of raw materials into a reactor and discharge of the treated feed at high pressures and temperatures.

Materials and Methods. It is proposed to transfer the process of barothermal processing to a higher zone of the phase diagram of the system p, t (pressure and temperature). This is a section of the superheated steam zone with temperature 300–374 °C, pressure 12–21 MPa and treatment exposure 30–60 seconds, which replaces costly processes of normalizing, expansion, extrusion and granulation. The change in enthalpy in the pressure range 0–21 MPa and temperature range 0–600 °C is shown. Thermal modes are presented as formulas which is the basic condition for the use of digital technologies.

Results. The design of the reactor with a thermal gate for loading and unloading, being the main unit of the production line of the feed heat treatment, was proposed. The results of the study are fundamental for the development of the sample flow low-capacity line.

Discussion and Conclusion. The transfer of the process of barothermal processing of feed into the zone of superheated steam allows for the transfer of poorly digestible elements of grain and legumes in easily digestible, pathogen-free feed. Advantages of the reactor and line include the user-friendly design, energy saving and possibility of implementation of advanced digital technologies.

Keywords: barothermal processing, animal feed, phase transitions, reactor, assembly line

For citation: Syrovatka V.I., Zhdanova N.V., Rasskazov A.N., Toropov D.I. Barothermal Processing of Animal Feed Ingredients. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):428-442. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.428-442>

Введение

Актуальность данной работы состоит в том, что объем производства и качество продуктов питания – зеркальное

отражение этих показателей в комбикормах¹ [1; 2]. Известно, что мировое производство комбикормов в 2017 году составило 1,07 млрд т², в том числе для

¹ Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»: утв. указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2016. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 15.05.2019).

² ЕМИСС за 2013–2017 гг. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru> (дата обращения: 15.05.2019).

свиней – 289 млн т или 28 % мирового производства; для птиц – 300 млн т, для молочных коров – 118 млн т. В Китае на 6000 заводах произведено 187 млн т комбикормов, в США – 173 млн т, в Бразилии – 70 млн т, в Индии – 34 млн т. В России произведено 27,3 млн т на комбикормовых заводах и в хозяйствах – 10,7 млн т. Общее производство комбикормов составило 38 млн т. Заводские корма использованы: для свиней – 10 млн т, для птиц – 15,2 млн т и для КРС – 2,1 млн т³. Кроме того, в животноводческих и птицеводческих хозяйствах ежегодно используется 40–50 млн т фуражного зерна в виде кормовых смесей. Мировое производство масличных культур (соя, рапс, арахис и подсолнечник) в сезоне 2016–17 года составило 509 млн т⁴, а с учетом семян хлопка, кокосовых орехов, масличной пальмы производство составит 571 млн т. В США произведено сои 114,3 млн т, при урожае 34 ц/га, в Бразилии – 101 млн т, в Аргентине – 57 млн т, в России – 3,5 млн т, а рапса – 1,5 млн т⁵.

Обзор литературы

Решение задачи вытекает из потребности в тепловой обработке ингредиентов комбикормов.

В зависимости от вида фуражного зерна, сорта растения, условий его произрастания и других факторов в нем содержится 56...70 % безазотистых экстрактивных веществ⁶, которые плохо усваиваются животными и птицей. При тепловой обработке крахмал переходит в усвояемые декстрины и полисахариды.

Нейтрализация антипитательных веществ в сое и рапсе. Соя и рапс – важные белковые и энергетические компоненты. Соевая мука является основным источником белка при производстве комбикормов, однако содержит 5...10 % антипитательных веществ-ингибиторов, которые подавляют и задерживают ферменты, вырабатываемые поджелудочной железой. В результате поджелудочная железа вынуждена продуцировать их более интенсивно, что вызывает ее гипертрофию [3–5].

Эффективным путем устранения ингибиторов является высокотемпературная обработка в сочетании с повышенным давлением. Увеличивает эффективность термообработки также предварительное пропаривание сои в течение 20–30 мин. Наибольшую энергетическую ценность в комбикормах составляют семена рапса, поскольку содержат 40–48 % жира и 21–33 % сырого протеина при коэффициенте переваримости 84,4–93,4 % (табл.1)⁷.

Однако семена рапса содержат эруковую кислоту, которая не утилизируется ферментативной системой млекопитающих и птиц и имеет тенденцию накапливаться в их организме. Эруковая кислота вызывает нарушения сердечно-сосудистой системы, инфильтрации скелетной мускулатуры и миокарда, цирроз печени. Доля эруковой кислоты в составе растительных масел: рапсовое масло 56–65 %, горчичное – 50 %, сурепное масло – 47 %. Семена рапса подлежат глубокой термообработке.

³ Производство комбикормов в России [Электронный ресурс]. URL: <https://agrovesti.net/news/indst/proizvodstvo-kombikormov-v-rossii.html> (дата обращения: 15.05.2019).

⁴ Мировой рынок: производство масличных культур [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--80arlem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-gynok-proizvodstvo-maslicnyh-kultur> (дата обращения: 15.05.2019).

⁵ UNESCO Sceince report: towards 2030. France: UNESCO Publishing, 2015. 794 p. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images> (дата обращения: 15.05.2019); **Фортов В. Е., Махутов Н. А.** Машиностроение России. В 2-х томах. Т. 1: Состояние и развитие. М.: ОЭММПУ РАН, 2010; Т. 2: Этапы и приоритеты развития. М.: ОЭММПУ РАН, 2016.

⁶ Зерновые культуры [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 15.05.2019).

⁷ Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник / под ред. И. М. Скурихина, В. А. Тутельяна. М.: ДеЛи принт, 2002. 126 с. URL: https://www.studmed.ru/skurihin-im-red-himicheskij-sostav-rossijskih-pishevyh-produktov_8fc891f30c3.html (дата обращения: 15.05.2019).

Химический состав масличных культур
The chemical composition of oilseeds

| Вид зерна / Type of grain | Вода, % / Water, % | Белок, % / Protein, % | Жир, % / Fat, % | Углеводы усвояемые, % / Digestible carbohydrates, % | Пищевые волокна, % / Alimentary fiber, % | Зола, % / Ash, % |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|---|--|------------------|
| Горох / Peas | 14,0 | 20,5 | 2,0 | 49,5 | 11,2 | 2,8 |
| Соя / Soy | 12,0 | 34,9 | 17,3 | 17,3 | 13,5 | 5,0 |
| Подсолнечник / Sunflower | 8,0 | 20,7 | 42,9 | 10,5 | 5,0 | 2,9 |
| Рапс / Rape | 8,1 | 30,8 | 43,6 | 7,2 | 5,8 | 4,5 |
| Фасоль / Beans | 14,0 | 21,0 | 2,0 | 47,0 | 12,4 | 3,6 |
| Чечевица / Lentils | 14,0 | 24,0 | 1,5 | 46,3 | 11,5 | 2,7 |
| Горчица / Mustard | 6,4 | 25,8 | 30,8 | 23,4 | 8,8 | 4,8 |

Температура разложения эруковой кислоты – 380 °С, а плавления – 33,8 °С⁸.

Зерновое сырье и другие компоненты, используемые для производства комбикормов, нередко обсеменены микроорганизмами, где присутствуют токсичные для человека и животных продукты метаболизма этих грибов. Обеззараживание всех компонентов улучшает качество комбикормов.

Использование в комбикормах рыбной, мясокостной муки, мелассы, жиров и других незерновых компонентов невозможно без глубокой тепловой обработки [6].

Достижение температуры обрабатываемого комбикорма 170–180 °С в настоящее время [7; 8] осуществляется в несколько этапов с применением сложных технологических схем и дорогостоящего оборудования: первый этап – нормализация смеси, то есть рассыпной комбикорм паром прогревается до 100 °С; второй – смесь пропускается через экспандер, где подогревается до 130 °С, затем – в экструдер,

где температура смеси достигает 150 °С и в заключение корма подаются в гранулятор, где температура гранул достигает 180 °С [9; 10]. Этой температуры недостаточно для более глубокой декстринизации (только 60 %). На всех трех этапах повышение температуры корма достигается трением при высоком давлении, что энергоемко. Все это ведет к увеличению удельного расхода электроэнергии. Технологическую схему тепловой обработки ингредиентов комбикормов следует упростить, что значительно снизит удельную энергоемкость, металлоемкость и капиталоемкость; это возможно при выполнении процесса тепловой обработки в области сухого пара⁹ [11; 12].

Материалы и методы

Исходя из мировых тенденций развития энергетики, необходимо переводить процесс баротермической обработки в более высокую область фазовой диаграммы системы p, t (давление, температура). В p, t -диаграмме фазового состояния воды рабочий

⁸ Эруковая кислота [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 15.05.2019).

⁹ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Изд. 3-е. М.: Pergamon Press, 1994. Ч. 1. Т. 5. 584 с. URL: http://old.pskgu.ru/ebooks/landau_05.html (дата обращения: 15.05.2019).

процесс тепловой обработки комбикормов смещен от нулевой к критической точке (374 °C)¹⁰ [13]. Это участок зоны перегретого пара с параметрами температуры 300–374 °C, давления 12–21 МПа и экспозицией обработки 30–60 с (рис. 1)¹¹, что позволяет исключить высокзатратные несовершенные процессы (экспандирование, экструдирование, гранулирование), упростить структурную схему поточных линий по производству гранулированных кормов, в несколько раз снизить энергоемкость и металлоемкость, использовать отработанный пар (120–150 °C) на предварительную тепловую обработку сои, рапса, зернового сырья, а также мелассы, жира и других добавок, применить цифровые технологии и малоемкостные поточные автоматизированные линии по производству обезвреженных, экологически чистых рассыпных, гра-

нулированных, лечебных кормов, а также вспученного фуражного зерна.

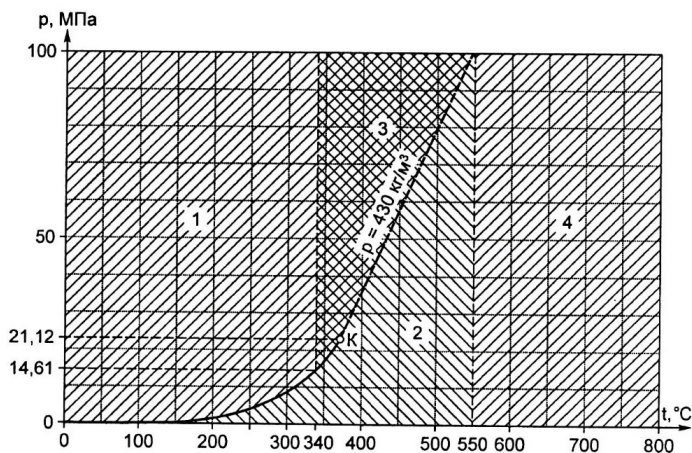
Энтальпия системы теплового процесса

Известно, что в результате подвода теплоты к телу ее температура повышается и вследствие увеличения объема тела производится внешняя работа; подведенная к телу теплота расходуется на увеличение внутренней энергии тела U и на совершение работы L ¹² [14].

Это выражается уравнением:

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2}, \quad (1)$$

где Q_{1-2} – теплота, сообщенная телу при нагревании от состояния 1 до состояния 2; ΔU_{1-2} – изменение внутренней энергии тела в том же процессе, равное разности внутренних энергий системы в точках 2 и 1; L_{1-2} – работа, совершенная телом в процессе перехода системы



Р и с. 1. Области применения уравнений состояния Международной системы в p, t -диаграмме: K – критическая точка

F i g. 1. Fields of application of equations of state International system in p, t -diagram: K – critical point

¹⁰ Toggerson B. K., Nguyen D. Physics 131: Forces, Energy and Entropy. Physics Educational Materials. Amherst, Massachusetts: University of Massachusetts Amherst Libraries, 2017. 443 p. URL: https://scholarworks.umass.edu/physics_ed_materials/1 (дата обращения: 15.05.2019).

¹¹ Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Изд. 2-е. М.: Энергоатомиздат, 1984. 80 с. URL: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/p/PNB/learning/Thermodynamics/Tab4/33380.pdf> (дата обращения: 15.05.2019).

¹² Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндли А. Е. Техническая термодинамика. М.: «Энергия», 1974. С. 34.

из точки 1 в точку 2 (повышение давления в котле).

Уравнение (1) выражает первый закон термодинамики или частный случай общего закона сохранения энергии: для любой изолированной системы количество энергии, заключенное в этой системе, сохраняется неизменным.

Это же соотношение, записанное в дифференциальной форме, имеет вид:

$$dQ = dU + dL. \quad (2)$$

Принято, что теплота, подводимая к системе, считается положительной, а теплота, отводимая от системы – отрицательной. Соответственно, работу, производимую системой, считать положительной, а работу, совершаемую над системой – отрицательной.

Так как работа расширения является функцией процесса p, V -диаграммы, то уравнение (2) можно записать:

$$dQ = dU + p dV. \quad (3)$$

Сумма внутренней энергии системы U и произведения давления системы p на величину объема системы V называется энтальпией (теплосодержанием) и обозначается через H :

$$H = U + pV. \quad (4)$$

Энтальпия – это та энергия, которая доступна для преобразования в теплоту или работу при определенной температуре и давлении. Энтальпия измеряется в тех же единицах, что и теплота, работа, внутренняя энергия.

Первый закон термодинамики характеризует процессы превращения энергии теплоты или работы с количественной стороны¹³.

Второй закон термодинамики характеризует качественную сторону этих

процессов. Так же как и первый закон, он сформулирован на основании опытов: любой реальный самопроизвольный процесс является необратимым. Теплота не может сама собой переходить от более холодного тела к более нагретому, поэтому идею о существовании вечного двигателя второго рода осуществить невозможно (Планк)¹⁴.

Термическим коэффициентом полезного действия (КПД) цикла η_B называется отношение работы цикла $(Q_1 - Q_2)$ к количеству теплоты Q_1 , подведенного к рабочему телу в цикле:

$$\eta_T = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (5)$$

где Q_2 – количество полезно использованной теплоты.

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (6)$$

где T_1 и T_2 – начальная и конечная температура цикла.

Энтропия (от греческого «поворот») – степень неполноты, неопределенности знаний, впервые был введен Клаузиусом в термодинамике в 1865 году для определения меры необратимого рассеивания энергии, меры отклонения реального процесса от идеального:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (7)$$

где dS – приращение энергии; δQ – минимальная теплота, подведенная к системе; T – абсолютная температура процесса.

Дифференциал энтальпии, выраженный в собственных переменных, через энтропию S и давление p :

$$dH = d(U + pV),$$

¹³ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика.

¹⁴ Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М: «Энергия», 1974. С. 54–56.

$$dH = \delta Q + Vdp, \quad (8)$$

$$dH = TdS + Vdp.$$

Энтальпией системы удобно пользоваться в тех случаях, когда в качестве независимых переменных, определяющих состояние системы, выбирают давление p и температуру T , $H(p, T)$.

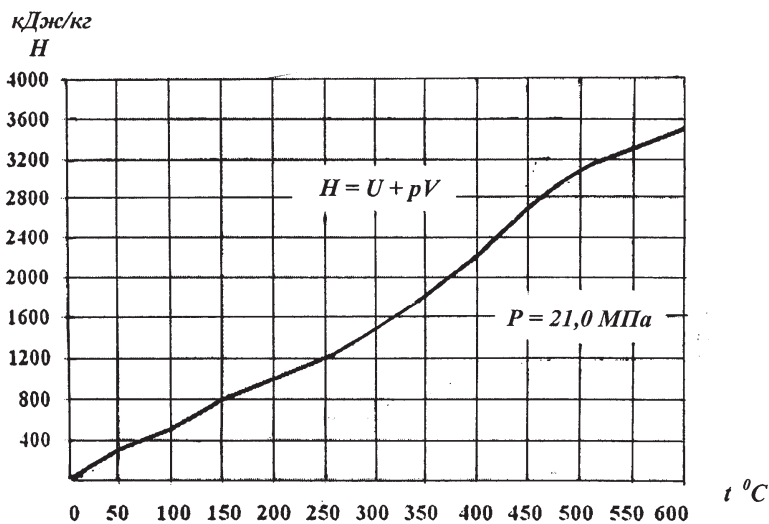
По таблице 3¹⁵ рассчитаны и показаны изменения энтальпии (рис. 2) в диапазоне t от 0 до 600 °С и p от 0 до 21,0 МПа.

Из графика (рис. 2) видно, что энтальпия системы при температуре 300–400 °С в пять раз выше, чем при температуре на участке 100 °С, а коэффициент теплопередачи резко возрастает. Этот тепловой поток при высоком давлении и коэффициенте теплопередачи ускоряет прогрев комбикормов и многократно сокращает время обработки (от 60–70 минут до 50–60 секунд). При этом достигается экономия удельных затрат энергии и металлоемкости.

Удельный расход комбикормов при использовании измельченных смесей фуражного зерна, но не подверженных тепловой обработке, возрастает в 1,2...1,3 раза. В таком случае выгодно применять, в особенности для свиней, вспучивание отдельных видов фуражного зерна или их смесей.

Задача заключается в обеспечении заданных режимов баротермической обработки концентрированных кормов в непрерывном потоке за счет создания устройств загрузки и выгрузки в виде тепловых затворов, обеспечивающих непрерывную загрузку сырья и выгрузку обработанных кормов (при высоком давлении и температуре), что позволяет исключить простой реактора при загрузке и выгрузке, повысить КПД реактора и его производительность, при этом снизить потери энергии [14].

Реактор баротермической обработки концентрированных кормов¹⁶ [29] включает горизонтально расположенную емкость (далее корпус) 1 (рис. 3)



Р и с. 2. Изменения энтальпии H при увеличении p от 0 до 21,0 МПа и t от 0 до 600 °С
 F i g. 2. Changes in the enthalpy H with increasing p from 0 to 21,0 MPa and t from 0 to 600 °С

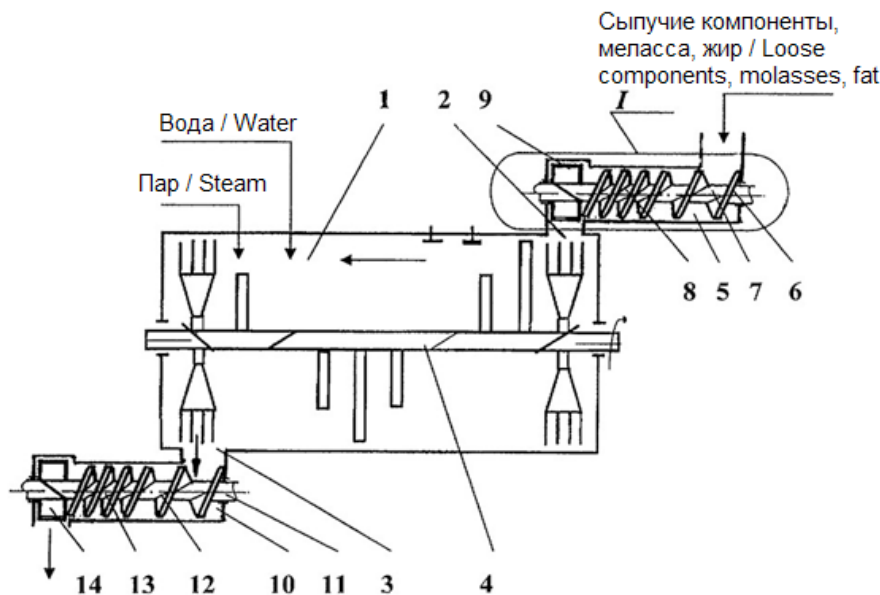
¹⁵ Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. С. 42–43.

¹⁶ Реактор баротермической обработки концентрированных кормов: пат. 2429731 Рос. Федерация. № 2010109483/13; заявл. 12.03.2010; опубл. 27.09.2011. Бюл. № 27.

с загрузочной горловиной 2, выгрузным люком 3 и рабочим органом 4. На загрузочной горловине 2 установлен тепловой затвор загрузки, состоящий из цилиндрического корпуса 5, внутри которого на валу 6 последовательно расположены: двухступенчатый шнек, прецизионно сопряженный с корпусом затвора (рис. 4), ленточная навивка и лопасти квадратной формы 9, установленные под углом $\alpha = 30^\circ$ к оси вала, имеющие рабочие кромки, заточенные под углом $15-20^\circ$. К выгрузному люку 3 присоединен тепловой затвор выгрузки, состоящий из цилиндрического корпуса 10, внутри которого на валу 11 последовательно расположены: двухступенчатый шнек с ленточной навивкой (12 и 13) и лопасти квадратной фор-

мы 14, установленные под углом 30° к оси вала, имеющие рабочие кромки, заточенные под углом $15-20^\circ$.

Конструктивное выполнение тепловых затворов загрузки и выгрузки в виде последовательно установленных на валу двухступенчатого шнека и лопастей позволяет за счет исполнения шнека, имеющего ленточную навивку (шаг навивки S первой ступени больше шага навивки второй ступени S_1 в 2 раза), принимать рассыпной концентрированный корм (сырье) первой ступени, перемещать его вдоль оси вала ко второй ступени, в которой происходит уплотнение и продавливание за счет изменения шага навивки и дальнейшее продвижение до встречи с лопастями, которые в свою очередь измельчают

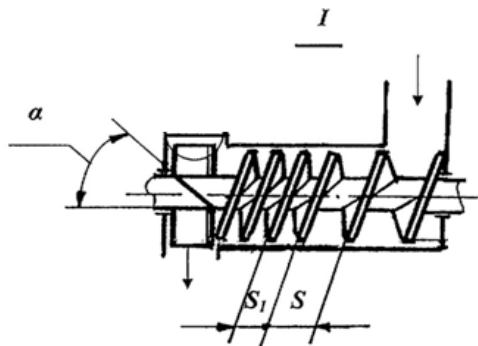


Р и с. 3. Реактор баротермической обработки концентрированных кормов:

- 1 – корпус реактора; 2 – загрузочная горловина реактора; 3 – выгрузной люк; 4 – рабочий орган реактора; 5 – корпус теплового затвора загрузки; 6 – вал; 7 – двухступенчатый шнек; 8 – одноступенчатый шнек; 9 – лопасти; 10 – корпус теплового затвора выгрузки; 11 – вал теплового затвора; 12 – первая ступень двухступенчатого шнека; 13 – вторая ступень шнека; 14 – лопасти

F i g. 3. Reactor for barothermal processing of concentrated feed:

- 1 – reactor vessel; 2 – reactor loading neck; 3 – unloading hatch; 4 – reactor operating unit; 5 – heat load valve case; 6 – shaft; 7 – two-stage auger; 8 – one-stage auger; 9 – blades; 10 – body of the thermal discharge valve; 11 – shaft of the thermal shutter; 12 – first stage of the two-stage auger; 13 – second stage of the auger; 14 – blades



Р и с. 4. Тепловой затвор
F i g. 4. Thermal shutter

уплотненную массу. Так как одним из основных условий работы реактора при баротермической обработке кормов является поддержание постоянного давления и температуры, то уплотненный во второй ступени шнека корм не дает возможности выхода, находящегося под давлением пара и соответственно потери теплоты, причем достигается это за счет прецезионного сопряжения между шнеком и корпусом. Измельчение уплотненной массы необходимо для равномерной дальнейшей баротермической обработки корма.

За счет наличия двух затворов одинаковой конструкции упрощается строение самого реактора и его обслуживание, так как он работает в непрерывном режиме.

Реактор баротермической обработки концентрированных кормов (рис. 3) работает следующим образом: концентрированный рассыпной корм (комбикорм или его компоненты) непрерывным потоком поступает в корпус 5 теплового затвора загрузки, непосредственно на первую ступень 7 двухступенчатого шнека, расположенного на валу 6, которая перемещает его вдоль оси вала ко второй ступени 8, при этом сыпучий корм уплотняется, частично разрушается, далее в спрессованном виде он передается к лопастям 9, имеющим заточенные рабочие кромки, которыми измельчается и принудительно самими

лопастями передается в загрузочную горловину 2 корпуса 1 реактора, в котором под воздействием высокой температуры и давления происходит баротермическая обработка корма, при этом рабочий орган 4 реактора производит рыхление, смешивание и перемещение его вдоль корпуса 1 к выгрузочному люку 3, под которым расположен тепловой затвор выгрузки. Выгрузка из реактора происходит принудительно рабочим органом 4 реактора в корпус 10 теплового затвора выгрузки непосредственно на первую ступень 12 двухступенчатого шнека, расположенного на валу 11 теплового затвора, которая перемещает его вдоль оси вала ко второй ступени 13, при этом на второй ступени сыпучий корм уплотняется и в спрессованном виде передается к лопастям 14, которыми измельчается и принудительно выталкивается наружу.

Использование данного реактора при баротермической обработке рассыпных концентрированных кормов позволяет исключить остановку реактора на загрузку и выгрузку, за счет надежной конструкции тепловых затворов загрузки и выгрузки (рис. 4), что дает возможность обеспечить непрерывную (поточную) работу реактора под рабочим давлением пара, ускорить время обработки, повысить производительность, сократить потери теплоты, а следовательно и энергии, при гаран-

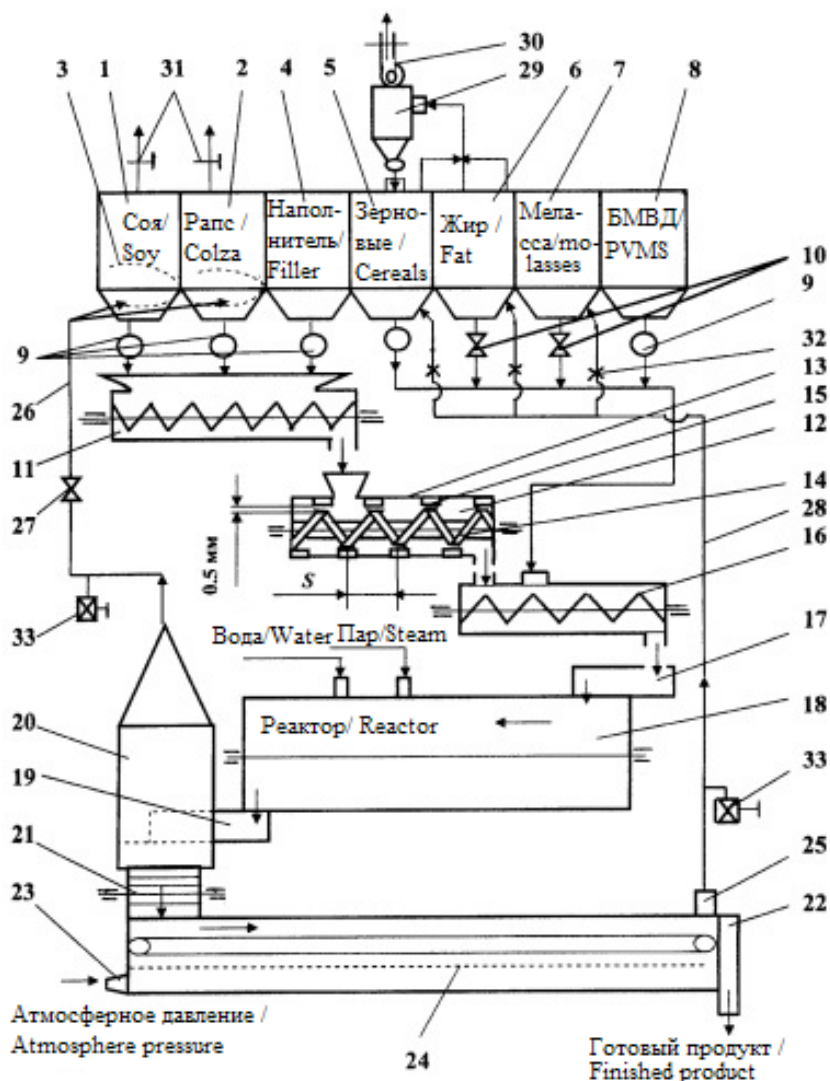
тированном выполнении процесса декстринизации крахмала и санитарной обработки концентрированных кормов.

Линия тепловой обработки комбикормов (рис. 5)¹⁷ включает приемный бункер для сои 1 (soy receiving bin 1) и приемный бункер для рапса 2 (rapeseed receiving bin 2) с установленными в их нижней части теплообменниками 3 (heat exchangers 3), бункер для наполнителей 4 (filler bin 4), для зерновых 5 (grain bin 5), для жира 6 (fat bin 6), для мелассы 7 (molasses hopper 7), для БМВД 8 (protein-vitamin mineral supplements bin 8), дозаторы непрерывного действия 9 (continuous dispensers 9) или краны 10 (cranes 10); под приемными бункерами для сои 1 (soy receiving bin 1), рапса 2 (rapeseed receiving bin 2) и наполнителей 4 (filler bin 4) размещен смеситель 11 (mixer 11), последовательно сообщенный с винтовой зерноплющилкой 12 (grain crusher 12), внутри цилиндрического корпуса которой 13 (cylindrical housing 13) расположены цилиндрический шнек 14 (cylindrical auger 14) с однозаходным винтовым элементом и радиальные кольца 15 (radial rings 15), установленные на внутренней стороне цилиндрического корпуса 13 (cylindrical housing 13) на расстоянии друг от друга равном шагу S-ленточной резьбы шнека с зазором к виткам шнека 0,5 мм и имеющие высоту 3–4 мм, и шнековым транспортером 16 (screw conveyor 16), соединенным с тепловым затвором загрузки 17 (thermal shutter boot 17) реактора баротермической обработки 18 (barothermal processing reactor 18), имеющего тепловой затвор выгрузки 19 (thermal shutter discharge 19), встроенный в газгольдер 20 (gazgolder 20), который нижней частью, посредством барабанного шлюза 21 (drum gateway 21) соединен с охладителем 22 (chiller 22), снабженным механизмом дозированной подачи атмосферного воздуха 23 (atmospheric

dosing mechanism 23), перфоратором 24 (perforator 24) и механизмом регулирования количества отбора теплоносителя 25 (mechanism for regulating the amount of coolant selection 25), а верхней частью посредством паропровода 26 (steam lines 26), имеющего кран 27 (crane 27), сообщен с теплообменниками 3 (heat exchangers 3) приемных бункеров 1 и 2 (receiving hopper 1 and 2), при этом охладитель 22 (chiller 22) через тепловую магистраль 28 (heat line 28) сообщен с приемными бункерами 5–7 (receiving bins 5–7). Над приемным бункером для зерновых 5 (receiving bin for grain 5) установлен циклон 29 (cyclone 29) с вентилятором 30 (fan 30), над приемными бункерами для сои 1 и рапса 2 (receiving bins for soybean 1 and rapeseed 2) установлены предохранительные клапаны 31 (safety valve 31), а на входе пара в приемные бункера для зерновых 5 (receiving bin for grain 5), жира 6 (fat bin 6), мелассы 7 (molasses hopper 7) установлены паровые краны 32 (steam taps 32). Паропровод 26 (steam lines 26) и тепловая магистраль 28 (heat line 28) снабжены устройством для сбора и слива конденсата 33 (device for collecting and draining condensate 33).

Работа линии тепловой обработки комбикормов (рис. 5) осуществляется следующим образом. Исходное сырье (ингредиенты) засыпают в приемные бункеры: 1 – для сои, 2 – для рапса, 4 – для наполнителя, 5 – для зерновых, 6 – для жира, 7 – для мелассы, 8 – для БМВД. При работающем реакторе баротермической обработки 18 через тепловой затвор выгрузки 19 и газгольдер 20 по паропроводу 26 и при открытом кране 27 пар под давлением поступает в теплообменники 3 приемных бункеров для сои 1 и для рапса 2, где происходит предварительное запаривание сои и рапса. Далее установленную дозу каждого из перечисленных компонентов подают в смеситель 11 дозаторами

¹⁷ Линия тепловой обработки комбикормов: пат. 2480132 Рос. Федерация. № 2011145708/13; заявл. 10.11.2011; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 12.



Р и с. 5. Линия тепловой обработки комбикормов
 Fig. 5. Heat treatment line of mixed feeds

непрерывного действия 9 из приемных бункеров 1, 2, 4. Смесь равномерным потоком высыпается в винтовую зерноплющилку 12, в которой за счет шнека 14, расположенного в цилиндрическом корпусе 13 и имеющего однозаходный винтовой элемент, продавливается вдоль зерноплющилки и в процессе продавливания через зазор, равный

0,5 мм между кольцами 15, установленными на внутренней стороне цилиндрического корпуса 13 на расстоянии друг от друга, равном шагу S-ленточной резьбы шнека, и имеющих высоту 3–4 мм, и витками шнека 14, происходит плющение и измельчение частиц до размеров толщиной менее 0,5 мм, чем обеспечивается хороший доступ

пара при дальнейшей обработке в баротермическом реакторе 18. Обработанная смесь сои, рапса и наполнителя поступает в шнековый транспортер 16, в который также посредством дозаторов непрерывного действия 9 и кранов 10 подаются ингредиенты из приемных бункеров 5–8, все составляющие смешиваются и перемещаются через тепловой затвор загрузки 17 в реактор баротермической обработки 18, где при заданных температуре, давлении и экспозиции происходит кондиционирование, гомогенизация кормов с одновременным перемещением обрабатываемой массы в сторону теплового затвора выгрузки 19, который также встроен в газгольдер 20, и далее обработанный комбикорм посредством барабанного шлюза 21 выгружается в охладитель 22, в который подается атмосферный воздух, регулируемый механизмом дозированной подачи 23 и, равномерно распределяясь по всей длине охладителя, снабженного перфоратором 24, охлаждается и выпускается в тару. При включенном вентиляторе 30 циклона 29 и посредством механизма регулирования количества отбора теплоносителя 25 по тепловой магистрали 28 тепло из охладителя подается к приемным бункерам 5–7 для подогрева зерновых, жира и мелассы и регулируется паровыми кранами 32. Небольшая часть ингредиентов (зерновых) засасывается пневмосистемой и, оседая в циклоне 29, сыпается в приемный бункер 5 для дальнейшей переработки. Образовавшийся конденсат с устройства для сбора и слива 33 на паровой системе 26 и тепловой магистрали 28 удаляют при неработающей линии. Избыток давления (пара), поступающего в теплообменники приемных бункеров 1 и 2, стравливают через предохранительные

клапаны 31. Линия тепловой обработки работает в непрерывном поточном режиме: содержит реактор с регулируемыми загрузочным и выгрузным затворами, узлы подготовки и подачи всех ингредиентов, пульт с интеллектуальной системой управления, исполняющий заданный технологический алгоритм работы, составленный на основе цифровой технологии и конструктивных параметров, представленных в статье.

Обсуждение и заключение

Перевод процесса баротермической обработки ингредиентов комбикормов в зону 300–374 °С и давления 12–21 МПа p, t -диаграммы обеспечивает стерильность, интенсификацию и надежность процесса перевода вредных и плохо усвояемых составляющих элементов зерновых и бобовых в полезные, легко усвояемые корма [15].

Применение реактора баротермической обработки кормов с тепловыми затворами взамен автоклавов и запарникам обеспечивает непрерывную поточную работу линии, экономию времени обработки и тепловой энергии¹⁸.

Линия тепловой обработки комбикормов с реактором совмещает энергоемкие процессы нормализации, экспандирования, экструдирования и гранулирования, при этом повышается качество обработки, снижается удельная энергоемкость и металлоемкость¹⁹. Комбикорма очищаются от сальмонеллы, патогенных бактерий, грибов и плесени. Время обработки 60–120 секунд. Представленный режим баротермической обработки и конструктивные решения линии могут быть полезными при разработке проектов на базе цифровых технологий комбикормовых предприятий и цехов животноводческих и птицеводческих ферм.

¹⁸ Сыроватка В. И. Тепловая обработка комбикормов. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства РАСХН, 2015. С. 68–74.

¹⁹ Сыроватка В. И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах. М.: ГНУ ВНИИМЖ, 2010. 248 с. <https://www.twirpx.com/file/1866990/> (дата обращения: 15.05.2019).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Измайлов А. Ю.** Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // Вестник российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 536–538. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. **Голикова Т. А.** Научное обеспечение реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. Выступление заместителя председателя Правительства РФ // Вестник Российской академии наук. 2019, Т. 89, № 4. С. 311–314. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873894311-314>
3. **Madau F. A., Furesi R., Pulina P.** Technical Efficiency and Total Factor Productivity Changes in European Dairy Farm Sectors // Agricultural and Food Economics. 2017. Vol. 5, Issue 17. Pp. 1–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40100-017-0085-x>
4. **Kostlivý V., Fuksová Z.** Technical Efficiency and Its Determinants for Czech Livestock Farms // Agricultural Economics. 2019. Vol. 65, Issue 4. Pp. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.17221/162/2018-AGRICECON>
5. Subsidies and Technical Efficiency in Agriculture: Evidence from European Dairy Farms / L. La-truffe [et al.] // American Journal of Agricultural Economics. 2017. Vol. 99, Issue 3. Pp. 783–799. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajae/aaw077>
6. **Kharmanda G.** The Safest Point Method as an Efficient Tool for Reliability-Based Design Optimization Applied to Free Vibrated Composite Structures // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. Т. 17, № 2 (89). С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
7. **Ferket P. R.** Technological Advances Could Make Extrusion an Economically Alternative to Pelleting // Feedstuffs. 1991. Vol. 63, Issue 9. Pp. 19–21. URL: <http://edepot.wur.nl/121964> (дата обращения: 15.05.2019).
8. **Krolczyk J. B.** Homogeneity Assessment of Multi-Element Heterogeneous Granular Mixtures by Using Multivariate Analysis of Variance // Tehnicki Vjesnik. 2016. Vol. 23, Issue 2. Pp. 383–388. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20151031183255>
9. **Best P.** Extruder Operating Costs. Comparisons with Double Pelleting in a Dutch Feedmill // Feed International. 1993. Vol 14, no. 6. Pp. 32–34.
10. **Wasserstein R. L., Lazar N. A.** The Asa’s Statement on P-Values: Context, Process and Purpose // The American Statistician. 2016. Vol. 70, no. 2. Pp. 129–133. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
11. **Krolczyk J. B.** The Effect of Mixing Time on the Homogeneity of Multi-Component Granular Systems // Transactions of Famera. 2016. Vol. 40, Issue 1. Pp. 45–56. URL: <https://hrcaak.srce.hr/file/229037> (дата обращения: 15.05.2019).
12. **Strielkowski W., Lisin E.** Economic Aspects of Innovations in Energy Storage // International Journal Of Energy Economics And Policy. 2017. Vol. 7, no. 1. Pp. 62–66. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/3528> (дата обращения: 15.05.2019).
13. **Khoshbin-e-Khoshnazar M. R.** Ice Phase Transition as a Sample of Finite System Phase Transition // Physics Education. 2016. Vol. 32, Issue 2. URL: <https://www.physedu.in/uploads/publication/23/371/4.-Ice-Phase-transition-as-a-sample-of-finite-system-phase--transition.pdf> (дата обращения: 15.05.2019).
14. **Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б.** Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 455–465. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465>
15. **Лухт Х., Долуд М., Зябрев В.** Гидротермическая обработка соевых бобов // Комбикорма. 2019. № 1. С. 31–34. URL: <http://kombi-korma.ru/arkhiv/no-01-19> (дата обращения: 15.05.2019).

Поступила 07.12.2019; принята к публикации 10.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторах:

Сыроватка Владимир Иванович, заведующий лабораторией ФГБНУ ВНИИМЖ, ИМЖ – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, Россия, г. Москва, поселение Рязановское, поселок Знамя Октября, д. 31), академик РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2846-9041>, vniimzh@mail.ru

Жданова Наталья Владимировна, инженер-исследователь ИМЖ, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, Россия, г. Москва, поселение Рязановское, поселок Знамя Октября, д. 31), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-044X>, vniimzh@mail.ru

Рассказов Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник ИМЖ, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (108823, г. Москва, поселение Рязановское, поселок Знамя Октября, д. 31), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-5404>, vniimzh@mail.ru

Торопов Дмитрий Иванович, полномочный представитель Республики Мордовия при Правительстве Российской Федерации, Постоянное представительство Республики Мордовия при Президенте Российской Федерации (127018, г. Москва, ул. Образцова, д. 29), toropov54@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. И. Сыроватка – научное руководство, подготовка начального варианта текста, развитие методологии, представление данных в тексте, курирование данных; Н. В. Жданова – сбор данных и доказательств, изучение концепции, подготовка рисунков; А. Н. Рассказов – компьютерные работы, сбор данных и доказательств, формализованный анализ данных; Д. И. Торопов – критический анализ и доработка текста, курирование данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Izmailov A.Yu. Smart Technologies and Robotic Tools in Agricultural Production. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019; 89(5):536-538. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. Golikova T.A. Scientific Support of the Implementation of the Priorities of the Scientific and Technological Development of the Russian Federation. Speech by Deputy Prime Minister of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019; 89(4):311-314. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873894311-314>
3. Madau F.A., Furesi R., Pulina P. Technical Efficiency and Total Factor Productivity Changes in European Dairy Farm Sectors. *Agricultural and Food Economics*. 2017; 5(17):1-14. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40100-017-0085-x>
4. Kostlivý V., Fuksová Z., Carpentier A. Technical Efficiency and Its Determinants for Czech Livestock Farms. *Agricultural Economics*. 2019; 65(4):175-184. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/162/2018-AGRICECON>
5. Latruffe L., Bravo-Ureta B.E. Subsidies and Technical Efficiency in Agriculture: Evidence from European Dairy Farms. *American Journal of Agricultural Economics*. 2017; 99(3):783-799. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1093/Ajae/Aaw077>
6. Kharmanda G. The Safest Point Method as an Efficient Tool for Reliability-Based Design Optimization Applied to Free Vibrated Composite Structures. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2017; 17(2):46-55. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-2-46-55>
7. Ferket P.R. Technological Advances Could Make Extrusion an Economically Alternative to Pelling. *Feedstuffs*. 1991; 63(9):19-21. Available at: <http://edepot.wur.nl/121964> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)

8. Krolczyk J.B. Homogeneity Assessment of Multi-Element Heterogeneous Granular Mixtures by Using Multivariate Analysis of Variance. *Tehnicki Vjesnik*. 2016; 23(2):383-388. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20151031183255>
9. Best P. Extruder Operating Costs. Comparisons with Double Pelleting in a Dutch Feedmill. *Feed International*. 1993; 14(6):32-34. (In Eng.)
10. Wasserstein R.L., Lazar N.A. The ASA's Statement on P-Values: Context, Process and Purpose. *The American Statistician*. 2016; 70(2):129-133. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
11. Krolczyk J.B. The Effect of Mixing Time on the Homogeneity of Multi-Component Granular Systems. *Transactions of Famena*. 2016; 40(1):45-56. Available at: <https://hrcak.srce.hr/file/229037> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)
12. Strielkowski W., Lisin E. Economic Aspects of Innovations in Energy Storage. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2017; 7(1):62-66. Available at: <https://www.econjournals.com/index.php/ijee/article/view/3528> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)
13. Khoshbin-e-Khoshnazar M.R. Ice Phase Transition as a Sample of Finite System Phase Transition. *Physics Education*. 2016; 32(2). Available at: <https://www.physedu.in/uploads/publication/23/371/4.-Ice-Phase-transition-as-a-sample-of-finite-system-phase--transition.pdf> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)
14. Kovalchuk M.V., Naraykin O.S., Yatsishina E.B. Nature-Like Technologies: New Opportunities and New Challenges. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019; 89(5):455-465. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895455-465>
15. Luht H., Dolud M., Zyabrev V. Hydrothermal Treatment of Soybeans. *Kombikorma* = Mixed Feeds. 2019; (1):31-34. Available at: <http://kombi-korma.ru/arkhiv/no-01-19> (accessed 15.05.2019). (In Eng.)

Received 07.12.2018; revised 10.04.2019; published online 30.09.2019

About authors:

Vladimir I. Syrovatka, Head of Laboratory of Institute of Livestock Mechanization Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (31 Poselok Znamya Oktyabrya, Poselenie Ryazanovskoe, Moscow 108823, Russia), Academician of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2846-9041>, vniimzh@mail.ru

Natalya V. Zhdanova, Research Engineer of Institute of Livestock Mechanization Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (31 Poselok Znamya Oktyabrya, Poselenie Ryazanovskoe, Moscow 108823, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-044X>, vniimzh@mail.ru

Aleksandr N. Rasskazov, Leading Researcher of Institute of Livestock Mechanization Branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (31 Poselok Znamya Oktyabrya, Poselenie Ryazanovskoe, Moscow 108823, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-5404>, vniimzh@mail.ru

Dmitriy I. Toropov, Plenipotentiary Representative of the Republic of Mordovia to the President of the Russian Federation, Permanent Mission of the Republic of Mordovia to the President of the Russian Federation (29 Obraztsova St., Moscow 127018, Russia), toropov54@mail.ru

Contribution of the authors:

V. I. Syrovatka – scientific management, writing the draft, development of the methodology, presentation of data in the text, supervising the data; N. V. Zhdanova – collecting data and evidence, studying the concept, preparing the drawings; A. N. Rasskazov – computer work, data collection and evidence, formal data analysis; D. I. Toropov – critical analysis and revision of the text, supervising the data.

All authors have read and approved the final manuscript.