

# ТЕХНОЛОГИИ, СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

DOI 10.12737/

УДК 664.769

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА ОТВЕРСТИЙ В МАТРИЦЕ ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА

**Потапов Максим Александрович**, аспирант кафедры «Пищевые производства», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет».

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: makspotapov@mail.ru

**Фролов Дмитрий Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Пищевые производства», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет».

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: surr@bk.ru

**Курочкин Анатолий Алексеевич**, д-р техн. наук, проф. кафедры «Пищевые производства», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет».

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: anatolii\_kuro@mail.ru

**Ключевые слова:** матрица, экструдер, оптимизация, помет, удобрение.

*Цель исследования – оптимизация количества отверстий в матрице экструдера для обработки птичьего помета с производством органического удобрения заданной влажности. В статье рассмотрена проблема утилизации и переработки отходов птицеводства – куриного помета. Эти отходы, в силу своего значительного ресурсного потенциала и возможного вредного воздействия на окружающую среду, представляют особый научный и практический интерес в части высокоэффективной переработки в полезный продукт или утилизации. Основным фактором, сдерживающим широкое применение экструзии при переработке подобных отходов птицеводства и животноводства, является недостаточно высокая энергоэффективность данной технологии. В работе приводится обоснование энергосберегающей технологии переработки отходов птицеводства за счет применения модернизированного экструдера, принцип работы которого основан на термовакуумном воздействии на выходящий из отверстий матрицы машины продукт. Описаны конструктивно-технологическая схема и способ применения модернизированного экструдера с вакуумной камерой в качестве средства для снижения влажности куриного помета с растительными остатками (подстилочного помета) и переработки в органическое удобрение заданной влажности. Для оптимизации работы экструдера с таким сырьем рассмотрены математические зависимости реологических характеристик помета с растительными наполнителями. С использованием капиллярного реометра были определены параметры:  $\sigma_0$  (предел текучести на входе в матрицу),  $\tau_0$  (напряжение сдвига при нулевой скорости на стенке матрицы),  $\alpha$  и  $\beta$  (коэффициенты скорости) и количество отверстий в матрице одношнекового экструдера. Экспериментально определена зависимость давления экструзии от времени, позволяющая оценить реологическое поведение помета в процессе его переработки и сделать вывод об оптимальном количестве отверстий в матрице экструдера.*

## OPTIMIZATION OF HOLES IN THE MATRIX OF A SINGLE-SCREW EXTRUDER FOR PROCESSING OF POULTRY MANURE

**M. A. Potapov**, Graduate Student of the Department «Food productions», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, travel Baidukova/Gagarina street, 1A/11.

E-mail: makspotapov@mail.ru

**D. I. Frolov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Food productions», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, travel Baidukova/Gagarina street, 1A/11.

E-mail: [surr@bk.ru](mailto:surr@bk.ru)

**A. A. Kurochkin**, Doctor of Technical Science, Professor of the Department «Food productions», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, travel Baidukova/Gagarina street, 1A/11.

E-mail: [anatolii\\_kuro@mail.ru](mailto:anatolii_kuro@mail.ru)

**Keywords:** matrix, extruder, optimization, manure, fertilizer.

The aim of the research is the holes optimization in extruder matrix for utilization and processing of poultry manure, with the development of organic fertilizer of required moisture. The article deals with utilization and processing of poultry manure in particular – chicken one. These wastes, due to their significant resource potential and possible harmful effect on the environment, are of particular scientific and practical interest in terms of highly efficient processing into a useful product or disposal. The main factor hindering the widespread use of extrusion in the processing of such poultry and livestock wastes is lack of high energy efficiency of this technology. The paper provides a substantiation of an energy-saving technology for processing poultry waste using a modernized extruder, the operating principle of which is based on thermal vacuum action on the product leaving matrix of the machine. The equipment and method of using a modernized extruder with a vacuum chamber as a means for reducing the moisture content of chicken manure with plant residues (litter droppings) and processing into organic fertilizer of required moisture content are described. To optimize the operation of an extruder with such raw materials, the mathematical dependences of the rheological characteristics of manure with plant inclusions are considered. Parameters  $\sigma_0$  (yield stress at matrix entrance),  $\tau_0$  (shear stress in zero velocity on the matrix wall),  $\alpha$  and  $\beta$  (velocity coefficients) and the number of holes in the matrix of a single screw extruder were determined using a capillary flowmeter. The dependence of the extrusion pressure on time was experimentally determined, which makes it possible to evaluate the flow behavior of the manure during its processing and draw a conclusion about the optimal number of holes in the extruder matrix.

Высокое содержание влаги, значительные площади для хранения, неоднородные составляющие ингредиенты привели к ограниченному использованию материалов биомассы, подобной птичьему помету. Транспортирование органических удобрений, полученных путем переработки помета по устаревшим технологиям, на большие расстояния является сложной и дорогостоящей задачей из-за их низкой плотности. Поэтому экструзия либо прессование и дальнейшее использование переработанного помета в виде гранул является одним из наиболее эффективных способов снижения затрат на утилизацию, транспортировку и использование этих биоматериалов. Согласно исследованиям, можно оптимизировать состав и качество гранул из биомассы и растительных материалов. Чтобы активировать природные адгезивные соединения, присутствующие в структуре биоматериалов, можно использовать процесс нагрева, зная рецептуру составляющих материалов, а также контролировать производственный процесс с учетом конфигурации применяемого оборудования.

На качество получаемых гранул влияют такие параметры экструдера, как геометрия матрицы, время прохождения материала через рабочий тракт, а также переменные параметры, такие как давление, температура, влажность и количество материала [1-3].

Определение физических и реологических свойств обрабатываемых материалов, в общем случае, требуется для расчета необходимой мощности привода экструдера. Птичий помет, смешанный с растительными материалами, является вязкоупругим, и свойства этих материалов можно выразить с помощью реологических моделей.

В последние 10-15 лет теоретическими исследованиями обосновано применение термовакуумных экструзионных технологий обработки помета и отходов, получаемых в процессе первичной переработки продукции птицеводства. В качестве готового продукта предлагается получать органическое удобрение или корм для сельскохозяйственных и домашних животных [4, 5]. При этом было выяснено, что основным фактором, сдерживающим широкое применение экструзии при переработке отходов птицеводства, является недостаточно высокая энергоэффективность данной технологии. В определенной степени этот факт объясняется многоступенчатым преобразованием в экструдере энергии одного вида в другой, а также тем, что теплота водяного пара,

получаемого в заключительной фазе рабочего процесса существующих машин этого вида, не регенерируется [3, 6].

Частичное решение указанной проблемы – разработка перспективных конструктивно-технологических схем экструдеров, осуществляющих термовакуумную обработку сырья [7, 8]. Таким образом можно увеличить энергоэффективность экструзионного процесса и решить проблему переработки сырья с повышенной влажностью. Способ производства кормов, основанный на этих принципах, запатентован [9] и практически реализован с помощью предлагаемого экструдера.

Целью предлагаемой модернизации экструдера является энергоэффективная обработка влажной массы в виде птичьего помета или навоза с целью получения органического удобрения с заданным содержанием влаги.

В предложенном экструдере тепловая энергия, выделяющаяся при выходе экструдата из отверстий матрицы, идет на предварительный подогрев подаваемого на переработку сырья. Для этого сырье перед поступлением в экструдер подогревают с помощью горячего пара, поступающего из воздушной камеры машины.

Влажность обрабатываемого сырья регулируется путем продувки через его слой горячего влажного водяного пара или горячего подсушенного водяного пара (при включенных ТЭНах).

Требуемая влажность готового продукта может быть получена за счет изменения давления в вакуумной камере экструдера с помощью вакуум-регулятора, а также путем изменения влажности обрабатываемого сырья.

На рисунке 1 изображена конструктивно-технологическая схема предлагаемого экструдера для переработки влажной массы в виде птичьего помета или навоза.

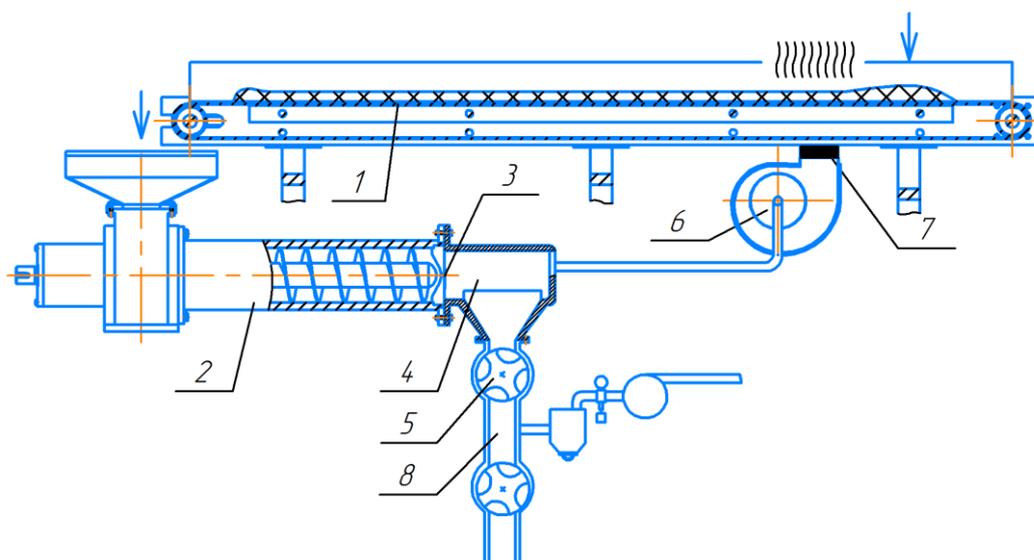


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема экструдера для переработки влажной массы (обозначения в тексте)

Птичий помет перемещается по сетчатой ленте конвейера 1. Попадая в экструдер 2, помет проходит через отверстия матрицы 3 и осушается в воздушной камере 4, после чего с помощью первого шлюзового затвора 5 перемещается в вакуумную камеру 8. В вакуумной камере происходит повторная сушка обрабатываемого сырья с последующей выгрузкой его с помощью второго шлюзового затвора 5 без разгерметизации вакуумной камеры 8 экструдера.

Образующийся горячий пар, удаляемый из воздушной камеры 4, имеет температуру 120...140°C и с помощью вентилятора 6 перемещается в зону сетчатого конвейера 1. При обработке сырья с повышенной влажностью (более 30%) включаются один, два или три воздушных ТЭНа 7. При этом откачиваемый из воздушной камеры 4 горячий водяной пар не только дополнительно нагревается, но и существенно снижает свою влажность.

Воздушная и вакуумная камера, а также соединяющие их трубопроводы, изолируются от внешней среды материалом с низкой теплопроводностью. В случае если обработке подвергается

помет или навоз с влажностью 20...25%, они могут дополнительно увлажняться за счет влажного горячего водяного пара, поступающего из воздушной камеры экструдера при выключенных ТЭНах.

При этом влажность обрабатываемого сырья регулируют, включая или отключая ТЭНы, а необходимая влажность готового продукта обеспечивается с помощью вакуум-регулятора экструдера.

**Цель исследования** – оптимизация количества отверстий в матрице экструдера для обработки птичьего помета с производством органического удобрения заданной влажности.

**Задачи исследования** – экспериментальными методами определить факторы, влияющие на реологические свойства птичьего помета с растительными наполнителями.

**Материалы и методы исследований.** Для определения реологических свойств помета с растительными наполнителями и моделирования одношнекового экструдера использовали капиллярный реометр. Были определены параметры:  $\sigma_0$  (предел текучести на входе в матрицу),  $\tau_0$  (напряжение сдвига при нулевой скорости на стенке матрицы),  $\alpha$  и  $\beta$  (коэффициенты скорости) и количество отверстий в матрице одношнекового экструдера (рис. 1). Образцы птичьего помета были взяты в производственных цехах АО «Васильевская птицефабрика» (г. Пенза).

Для движения капиллярного реометра использовали гидравлический пресс. Этот набор позволяет установить желаемое давление для прохода или постоянную скорость приложенного усилия для прохождения пастообразных материалов через матрицу реометра. Набор состоит из фиксированной части (реометр местоположения), подвижной части (гидравлический цилиндр) и гидравлического домкрата для вдавливания поршня в реометр. Максимальное давление, которое устройство может оказать на поршень, составляет 25 МПа.

**Результаты исследований.** Максимальное усилие экструзии в процессе гранулирования можно определить по уравнению (1):

$$F = P \cdot A, \quad (1)$$

где  $F$  – сила, необходимая для прохождения материала через матрицу, Н;

$P$  – давление, прикладываемое к поршню реометра, Па;

$A$  – поперечное сечение поршня, м<sup>2</sup>.

Когда обрабатываемая смесь птичьего помета с растительными наполнителями проходит через ствол экструдера в открытый штамп, поршень должен преодолеть трение и напряжение сдвига материала на корпусе штампа. Этот метод предполагает моделирование смеси птичьего помета с растительными наполнителями как квазипластического материала.

Давление экструзии, необходимое для перемещения смеси птичьего помета с растительными наполнителями из круглого цилиндра диаметром  $D$  через концентрическую головку диаметром  $D_0$  и длиной  $L$  при скорости  $v$  рабочей площадки фильеры, можно представить в виде уравнения (2):

$$P = 2(\sigma_0 + \alpha v) \ln \frac{D_0}{D} + 4(\tau_0 + \beta v) \left( \frac{L}{D} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – начальный предел текучести, МПа;

$\tau_0$  – напряжение сдвига при нулевой скорости (начальное напряжение на стенках матрицы), МПа;

$\alpha, \beta$  – параметры, характеризующие влияние скорости на вход в матрицу.

Зависимость давления экструзии фильеры от длины и диаметра штампа и рабочих скоростей поршня показана на рисунке 2. Согласно диаграмме реологические параметры  $\alpha, \sigma_0, \tau_0, \beta$  вычисляют с использованием уравнений (3-6).

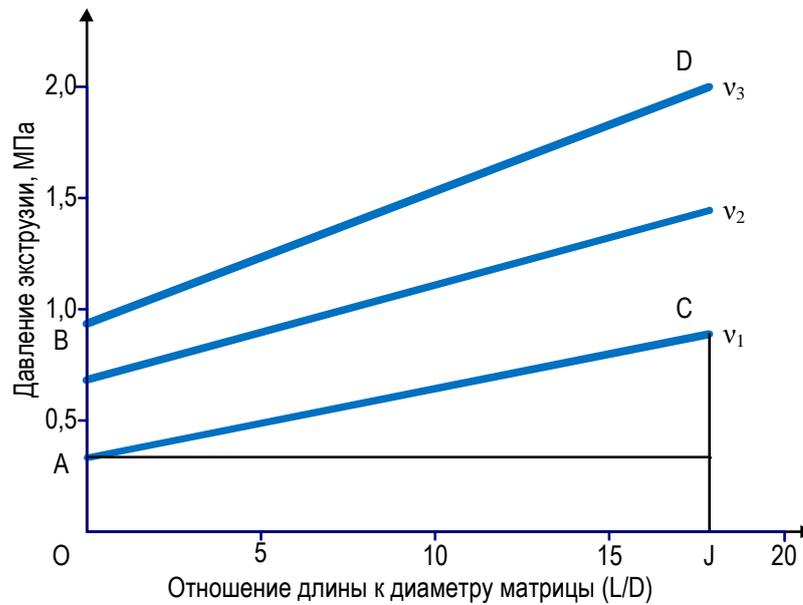


Рис. 2. Давление экструзии фильеры в зависимости от отношения длины к диаметру при различной скорости материала  $v$  (мм/с)

Параметры, характеризующие влияние скорости материала на вход в матрицу:

$$\alpha = \frac{OB-OA}{2(v_2-v_1)\ln\frac{D}{D_0}}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{(DJ-OB)-(CJ-OA)}{4OJ(v_2-v_1)}. \quad (4)$$

Начальный предел текучести:

$$\sigma_0 = \frac{OAv_2-OBv_1}{2(v_2-v_1)\ln\frac{D_0}{D}}. \quad (5)$$

Напряжение сдвига при нулевой скорости:

$$\tau_0 = \frac{v_2[(CJ)-(OA)]-v_1[(DJ)-(OB)]}{4(OJ)(v_2-v_1)}. \quad (6)$$

Примечательно, что выбор скорости пресса основан на максимальном давлении, которое пресс может создавать на этом уровне скорости, и это давление является тем же давлением, которое одношнековый экструдер может создавать на разных скоростях возле фильеры.

В процессе экструзии материалы могут проходить более чем через одно, параллельное друг другу, отверстие в матрице. Падение давления из-за потока помета, перемещаемого через цилиндр диаметром  $D_0$  в посадочную площадку штампа диаметром  $D$ , может быть выражено с помощью уравнения 2. Если объемный расход  $Q$  проходит равномерно через  $N$  отверстий диаметром  $D$ , средняя скорость  $v$  материала может быть определена на основании уравнения (7):

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 N v. \quad (7)$$

В том случае, когда помет протекает через цилиндр диаметром  $D$  с числом отверстий матрицы  $N$ , и если он проходит через все отверстия, средняя скорость  $v$  материала зависит от отношения  $D_0/\sqrt{N}$ . Путем определения скорости  $v$  из уравнения (7) и подстановки ее значения в уравнение давления экструзии (2) общее падение давления из-за прохождения помета через  $N$  отверстий может быть определено с помощью уравнения (8):

$$P = 2 \left( \sigma_0 + \frac{4\alpha Q}{\pi D^2 N} \right) \ln \left( \frac{D_0}{D\sqrt{N}} \right) + 4 \left( \tau_0 + \frac{4\beta Q}{\pi D^2 N} \right) \left( \frac{L}{D} \right). \quad (8)$$

После вычисления значений  $\alpha$ ,  $\sigma_0$ ,  $\tau_0$  и  $\beta$  по уравнениям (3-6) и замены в уравнении (8), определения давления  $P$  и объемного расхода  $Q$  из экспериментов с реометром, с учетом известных значений  $L$ ,  $D$  и  $D_0$  (спецификация матрицы) неизвестным остается только количество отверстий  $N$ , которое можно определить из уравнения (8).

Результат реологического поведения помета во время исследований показан на рисунке 3.

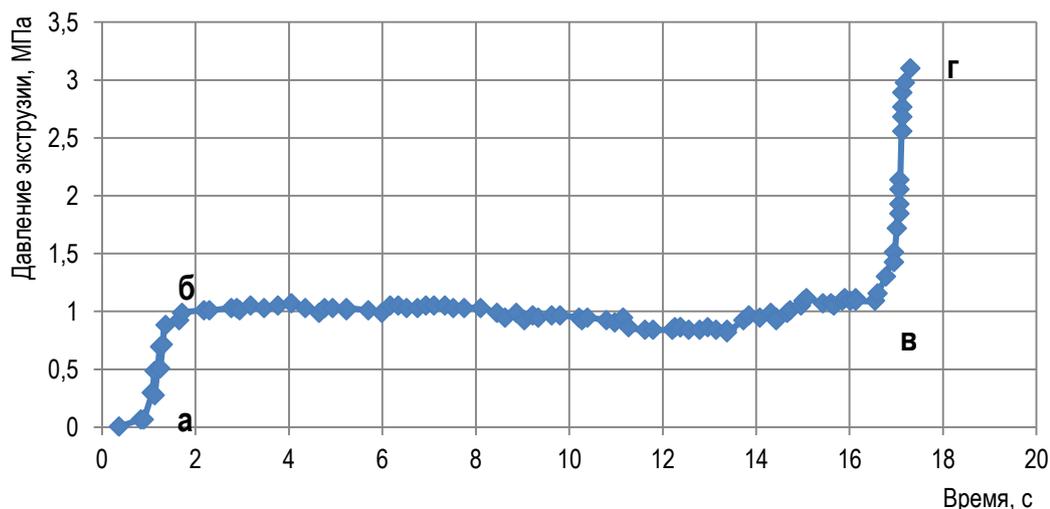


Рис. 3. Давление экструзии в зависимости от времени при  $v = 10$  мм/с,  $D = 3$  мм,  $L/D = 8$  для помета с содержанием влаги 50%

Представленную на рисунке кривую можно разделить на три области потока: уплотнение (а-б), установившееся состояние (б-в) и состояние материала у дна цилиндра (в-г). Воздух, захваченный пометом с наполнителями, выходит через область уплотнения. Так как помет значительно менее эластичен, чем воздух, давление экструзии начинает очень быстро расти, пока не достигнет пика. В этот момент начинается течение материала. Сразу после начала потока существует переходная область, где структура потока и давление экструзии нестабильны (для этого материала данная область весьма незначительна). Через короткое время достигается некая оптимальная схема потока, и остальная часть экструзионного цикла проходит в номинально установившихся условиях. Когда поршень доходит до конца хода, становится очевидным внезапное повышение давления.

**Заключение.** Физические и реологические свойства помета с растительными наполнителями важны для совершенствования конструкции матрицы одношнекового экструдера, например, оптимизации количества отверстий в ней. Количество отверстий в матрице экструдера  $N$  определяется путем вычисления параметров  $\alpha$ ,  $\sigma_0$ ,  $\tau_0$  и  $\beta$ , давления  $P$  и объемного расхода  $Q$  с последующей подстановкой их значений в соответствующих уравнениях.

#### Библиографический список

1. Денисов, С. В. Определение пропускной способности зоны загрузки пресс-экструдера / С. В. Денисов, В. В. Новиков, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 12 (62). – С. 73-76.
2. Курочкин, А. А. Регулирование функционально-технологических свойств экструдатов растительного сырья / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, П. К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 4. – С. 86-91.
3. Курочкин, А. А. Методологические аспекты теоретических исследований пресс-экструдеров для обработки растительного крахмалсодержащего сырья / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, В. В. Новиков, С. В. Денисов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – №6(10). – С. 46-54.
4. Курочкин, А. А. Технология производства кормов на основе термо-вакуумной обработки отходов сельскохозяйственного производства / А. А. Курочкин, Д. И. Фролов // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4 (1). – С. 36-40.
5. Курочкин, А. А. Энергосберегающая технология переработки куриного помета в органическое удобрение / А. А. Курочкин // Инновационная техника и технология. – 2018. – № 3 (16). – С. 16-19.
6. Sarghini, F. Experimental analysis and numerical simulation of pasta dough extrusion process / F. Sarghini, A. Romano, P. Masi // Journal of Food Engineering. – 2016. – Vol. 176. – P. 56-70.
7. Пат. 2561934 Российская Федерация, МПК A23P 1/22 B29C 47/38. Экструдер с вакуумной камерой / Шабурова Г. В., Воронина П. К., Шабнов Р. В. [и др.]. – №2014125348 ; заявл. 23.06.14 ; опубл. 10.09.15, Бюл. №27. – 7 с.

8. Пат. 198439 Российская Федерация, МПК А23Р 30/20 СПК А23Р 30/20. Экструдер с вакуумной камерой / Курочкин А. А., Гарькина П. К., Шабурова Г. В. [и др.]. – №2020110297 ; заявл. 10.03.20 ; опубл. 09.07.20, Бюл. № 19. – 6 с.

9. Пат. 2610805 Российская Федерация, МПК А23К 40/25 А23К 10/26 А23К 10/37. Способ производства кормов / П. К. Воронина, А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова [и др.]. – № 2015119627 ; заявл. 25.05.15 ; опубл. 15.02.17, Бюл. № 5. – 8 с.

#### References

1. Denisov, S. V., Novikov, V. V., Kurochkin, A. A., & Shaburova, G. V. (2009). Opredelenie propusknoi sposobnosti zony zagruzki press-ekstrudera [Determination of extruder loading capacity]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Bulletin of Altai State Agrarian University*, 12 (62), 73-76 [in Russian].

2. Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V. & Voronina, P. K. (2012). Regulirovanie funktsionalino-tekhnologicheskikh svoystv ekstrudatov rastitelinogo siriiia [Regulation of functional and technological properties of herb material extrudates]. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii – Bulletin Samara state agricultural academy*, 4, 86-91 [in Russian].

3. Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V., Novikov, V. V., & Denisov, S. V. (2013). Metodologicheskie aspekty teoreticheskikh issledovaniy press-ekstrudеров dlia obrabotki rastitelinogo krahmalsoderzhashhego siriiia [Methodological aspects of theoretical studies of extruders for processing vegetable starch-containing raw materials]. *XXI vek: itogi proshlogo i problem nastoiashchego plius – XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*, 6 (10), 46-54 [in Russian].

4. Kurochkin, A. A., & Frolov, D. I. (2014). Tekhnologiya proizvodstva kormov na osnove termo-vakuumnoi obrabotki otkhodov seliskokhoziaistvennogo proizvodstva [Feed production technology based on thermo-vacuum processing of agricultural waste]. *Innovatsionnaia tekhnika i tekhnologiya – Innovative machinery and technology*, 4 (01), 36-40 [in Russian].

5. Kurochkin, A. A. (2018). Energoberegaiushchaia tekhnologiya pererabotki kurinogo pometa v organicheskoe udobrenie [Energy-Saving technology for processing poultry manure into organic fertilizer]. *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya – Innovative machinery and technology*, 3 (16), 16-19 [in Russian].

6. Sarghini, F., Romano, A., & Masi, P. (2016). Experimental analysis and numerical simulation of pasta dough extrusion process. *Journal of Food Engineering*, 176, 56-70.

7. Shaburova, G. V., Voronina, P. K., & Shabnov, R. V. et al. (2015). Ekstruder s vakuumnoi kamerой [Extruder with a vacuum chamber]. *Patent 2561934, Russian Federation, 2014125348* [in Russian].

8. Kurochkin, A. A., Garkina, P. K., Frolov, D. I., Blinokhvato, A. A., & Potapov, M. A. (2019). Ekstruder s vakuumnoi kamerой [Extruder with a vacuum chamber]. *Patent 192684, Russian Federation, 2020110297* [in Russian].

9. Voronina, P. K., Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V., Frolov, D. I., & Mishanin, A. L. (2017). Sposob proizvodstva kormov [Method for the production of feed]. *Patent 2610805, Russian Federation, 2015119627* [in Russian].