

4. Sysuev V. A., Savinykh P. A., Kazakov V. A. Patent RU No. 2399420, MPK V02S 4/06. Val'tsovyi stanok (Grinding mill), zayavitel' i patentoobladatel' Gosudarstvennoe uchrezhdenie Zonal'nyi nauch.-issled. in-t sel'skogo khozyaistva Severo-Vostoka im. N. V. Rudnitskogo (RU), No. 2009100228, zayavl. 11.01.2009.
5. Sysuev V. A., Savinykh P. A., Kazakov V. A., Sychugov Yu. V. Pat. 2417778 Rossiiskoi Federatsii, MPK V02S 4/06. Sposob plyushcheniya furazhnogo zerna i ustroystva dlya ego osushchestvleniya (Crushing method of fodder grain and its implementation equipment), zayavl.01.04.2011, opubl. 10.03.2013, Byul. No. 7, 9 s., il.
6. Zabolotskikh I. Yu. Sovershenstvovanie rabocheho protsessa tekhnicheskikh sredstv plyushcheniya i konservirovaniya furazhnogo zerna (The improvement of operation process of technical means for fodder grain crushing and conservation), dis...kand. tekhn. nauk, Kirov, 2007, 171 p.
7. Kazakov V. A. Dvizhenie zernovki v rabochei zone dvukhstupenchatoi plyushchilki zerna (Movement of grain in working space of two-step grain crusher), Vestnik NGEI, 2013, No. 12(31), pp. 36–42.
8. Sysuev V. A., Savinykh P. A., Kazakov V. A. Issledovaniya tekhnologicheskikh parametrov dvizheniya zernovki v dvukhstupenchatoi plyushchilke zerna (Investigation of technological parameters of bruchid flows in double-stage grain crusher), Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaistve, Ch. 3, Energosberegayushchie tekhnologii v zhivotnovodstve i stacionarnoi energetike, tr. 9-i nauch.-tekhn. konf. (21–22 maya 2014 goda, g. Moskva, GNU VIESKh), 2014, pp. 136–142.
9. Sysuev V. A., Aleshkin A. V., Savinykh P. A. Kormoprigotovitel'nye mashiny. Teoriya, razrabotka, eksperiment (Fodder production mashines. Theory, development, experiment), v 2-kh t. Kirov, Zonal'nyi NIISKh Severo-Vostoka, 2009, T. 2, 496 p.
10. Susyev W. A., Savinykh P. A., Odegov W. A., Zabolotsky I. J. Wyniki badań eksperymentalnych w celu określenia optymalnych parametrów pracy dwustopniowego zgniatacza ziarna, Materiały na konferencje/Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzględnieniem ochrony środowiska istandardow ue, Warszawa, 2004, pp. 441–446
11. Firsov M. M. Planirovanie eksperimenta pri sozdanii sel'skokhozyaistvennoi tekhniki (Planning of experiment at the development of agricultural equipment), Moscow, MSKhA, 1999, 129 p.
12. Andreev V. A. Ispol'zovanie statisticheskogo paketa Statgraphics plus v. 5.1 dlya obrabotki rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy (Use of Statgraphics plus v. 5.1 for the processing of experimental results), metod. posobie, Kirov, FGBOU VPO Vyatskaya GSKhA, 2012, 32 p.

УДК 631.363

К АНАЛИТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА

Е. В. Пепеляева, канд. техн. наук; **В. С. Кошман**, канд. техн. наук, доцент,
ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ,
ул. Петропавловская, 23, г. Пермь, Россия, 614990
E-mail: tsat@pgsha.ru

Аннотация. В современных экономических условиях поиск резервов повышения молочной продуктивности дойных коров и в условиях Пермского края имеет высокую практическую значимость. В результате проведения поисковых исследований установлено, что на этом пути особый интерес представляет экструдирование растительного сырья (зерновых) в целях его переработки на корм скоту. В теплонапряженных условиях экструзии в зерновых происходят значимые биохимические изменения в глубинах питательных веществ: декстринизация крахмала до глюкозы, изменение структуры клетчатки, стерилизация кормов, улучшение их вкусовых качеств. Подобное существенно влияет на достигаемый при вскармливании ими эффект. Найдены взаимосвязи между параметрами потока зерновых в приточном канале шнекового экструдера. Данные связи получены на основе законов сохранения массы вещества и второго закона Ньютона. Давление экструдирования в предматричной зоне p_2 предложено вычислять по формуле: $p_2 = N \cdot \Delta\tau \cdot S_2^{-1} \cdot L^{-1} + S_3 \cdot S_2^{-1} \cdot p_3$, где N – мощность, подводимая к материалу на длине потока L , $\Delta\tau$ – время обработки, S – площадь сечения. Подстрочный индекс 2 соотносит параметры к потоку перед матрицей, а подстрочный индекс 3 – непосредственно за ней. Приведены результаты количественной оценки величины давления в зависимости от конструктивных параметров шнековых экструдеров. Результаты прогноза отвечают величине давления, наблюдаемой на практике. Приведены результаты экспериментального исследования процесса экструдирования озимой ржи.

Ключевые слова: экструдирование зерновых, шнековый экструдер, уравнение массового расхода, уравнение количества движения, уравнение энергии.

Введение. Повышение уровня продовольственной безопасности страны предполагает и совершенствование технологий переработки растительного сырья. Одним из перспективных способов производства кормов является экструдирование, при котором зерно подвергается мощному комплексному силовому и тепловому воздействию, сопровождающемуся деформациями сдвига в объеме перерабатываемого растительного сырья. В целенаправленно реализуемых теплонапряженных условиях в исходном сырье происходят существенные биохимические изменения в глубинах питательных веществ, в числе которых декстринизация крахмала до глюкозы, изменение структуры клетчатки, нейтрализация нежелательных для питания компонентов, стерилизация кормов, улучшение их вкусовых качеств. [1–7]. В то же время скармливание животным кормов, полученных путем экструдирования, способствует повышению их усвояемости, более полному использованию питательных веществ организмом животных, повышению удоев коров [8–11]. Исследование влияния физико-механических факторов (давление, температура, напряжение, интенсивность сдвига) на достигаемые результаты предполагает знание взаимосвязей между технологическими и конструктивными параметрами экструдеров.

К настоящему времени инженерная методика расчета параметров шнековых экструдеров отсутствует. Предпринимаются попытки выхода на искомые взаимосвязи между параметрами через результаты решения дифференциальных уравнений движения жидкости [4]. Как известно, данные уравнения являются математическими выражениями базовых законов физики. А следовательно, на основе известных из физики законов к искомым взаимосвязям можно прийти и более простым путем. Подобный подход в полной мере реализован в инженерной гидравлике. Ниже задачу будем решать по аналогии с известным из аэродинамики случаем прохождения сжимаемого газа через ударные волны и скачки уплотнения. Целью данной работы является теоретическое описание взаимосвязей между конструктивными и технологическими параметрами шнекового экструдера.

Методика. Полагаем, что шнек экструдера неподвижен, а корпус вращается. Винтовой

канал разворачиваем на плоскость. Нижняя граница полученного плоского канала неподвижна, а верхняя движется с некоторой скоростью $V_{КХ}$ под углом к продольной оси. Продольная составляющая действующей на поток силы представляет собой результат совместного действия стенки и встречной для потока силы давления, возникающей по причине гидродинамического сопротивления преграды, которой является формирующая матрица. Поле скоростей V результирующего течения можно рассматривать как суперпозицию поля скоростей $V_{КХ}$ куэттовского течения, вызванного только движущейся верхней стенкой канала [12, 13], и поля скоростей $V_{РХ}$ пуазейлевского течения [14], обусловленного наличием градиента давления, который препятствует движению экструдата.

Давление p_2 в потоке перед матрицей существенно превышает величину давления p_1 на входе в проточный канал экструдера (сечение 1-1 выбрано на входе в проточный канал экструдера). В данной связи пуазейлевское течение направлено встречно куэттовскому. Скорость результирующего течения равна:

$$V = V_{КХ} - V_{РХ} . \quad (1)$$

Результирующий массовый расход экструдата

$$\dot{m} = \dot{m}_К - \dot{m}_Р , \quad (2)$$

где $\dot{m}_К$ и $\dot{m}_Р$ – соответственно массовый расход куэттовского и пуазейлевского течения. В реальных технологических режимах характер течения экструдата близок к куэттовскому, что свидетельствует в пользу неравенства

$$\dot{m}_К > \dot{m}_Р ,$$

что подтверждается на практике.

Для куэттовского течения справедливы равенства

$$V_{КХ} = R\omega \cos\varphi ; \quad (3)$$

$$\dot{m}_К = \frac{1}{2} V_{КХ} h b \bar{\rho} , \quad (4)$$

где R – наружный радиус шнека; ω – угловая скорость вращения шнека; φ – угол подъема винтовой линии шнека; b – ширина канала; h – глубина канала; $V_{КХ}$ – проекция скорости подвижной верхней стенки канала на его продольную ось; $\bar{\rho}$ – средняя плотность материала.

Материал при своем движении по проточному каналу воспринимает энергию от привода шнека. Встречая преграду (матрицу), поток подтормаживается. В результате тор-

можения энергия потока частично преобразуется во внутреннюю энергию (это приводит к росту температуры до величины T_2), а частично – в потенциальную энергию давления (давление увеличивается до p_2), материал сжимается и его плотность возрастает до ρ_2 .

Обозначим параметры потока до матрицы ρ_2, V_2, p_2, T_2 и S_2 , а непосредственно после матрицы – через ρ_3, V_3, p_3, T_3 и S_3 . Здесь T – температура, S – площадь живого сечения.

Уравнение расхода записываем в виде

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \text{const} \text{ (по потоку);} \\ \rho_2 V_2 S_2 &= \rho_3 V_3 S_3 = \dot{m}, \end{aligned} \quad (5)$$

где \dot{m} – массовый расход.

В согласии со вторым законом Ньютона первая производная от количества движения $m_i V_i$ материальной точки равна действующей на нее силе:

$$\frac{d}{dt} (m_i v V_i) = F_i.$$

Элементарный импульс действующей на точку силы

$$F_i dt = d(m_i V_i),$$

а если $F_i = \text{const}$ и $m_i = \text{const}$, то $\Delta(m_i V_i) = F_i \Delta t$.

При экструдировании за время обработки Δt :

$$\begin{aligned} F \Delta t &= p_2 S_2 - p_3 S_3; \\ \Delta(m V) &= \rho_2 W_2 V_2 - \rho_3 W_3 V_3 \end{aligned}$$

где p_2 – давление материала при входе в матрицу; S_2 – площадь сечения, на которую действует давление p_2 ; S_3 – площадь сечения потока на срезе матрицы, на которую по нормали действует давление p_3 (ниже при проведении количественной оценке величину p_3 принимаем равной атмосферному давлению $p_{\text{атм}}$); ρ_2 и ρ_3 – плотность материала соответственно на входе в матрицу и непосредственно за ней; W_2 и W_3 – там же объем материала; V_2 и V_3 – там же средние скорости материала; $F \Delta t > \Delta(m V)$.

Импульс силы $F \Delta t$ создается в результате подвода мощности N к обрабатываемому материалу при его перемещении на длину L . Имеем равенство $N \Delta t = (p_2 S_2 - p_3 S_3) L$. Тогда абсолютное давление перед матрицей

$$p_2 = \frac{N \cdot \Delta t}{S_2 \cdot L} + \frac{p_3 \cdot S_3}{S_2} \quad (6)$$

Имеем параметры лабораторного экструдера: диаметр шнека $d = 63$ мм, глубина нарезки $h = 10$ мм, ширина канала $b = 58$ мм, угол нарезки $\varphi = 17$ градусов, температура по зонам $t = 70-130-150^\circ\text{C}$, частота вращения шнека $n = 50 \text{ мин}^{-1}$, величина $\frac{N}{S_2 \cdot L} = 1,2 \cdot 10^3$ и время

обработки материала в экструдере 5 с, площади сечений $S_2 = 320 \text{ мм}^2$ и $S_3 = 420 \text{ мм}^2$. Тогда, согласно равенству (6), развиваемое экструдером давление p_2 равно 5 Мпа, что по порядку величины отвечает реализуемому экструдером при его работе.

Уравнение энергии (уравнение Бернулли для сжимаемого материала):

$$i_2 + \frac{V_2^2}{2} = i_3 + \frac{V_3^2}{2} + \xi \frac{V_3^2}{2}, \quad (7)$$

где i – энтальпия единицы массы экструдированного материала; V – средняя скорость, ξ – коэффициент гидравлического сопротивления. Тогда, определяя удельную энтальпию i через удельную теплоемкость при постоянном давлении c_p как $i = c_p \cdot T$, приходим к выражению для вычисления температуры материала в сечении потока перед матрицей:

$$T_2 = \frac{1}{c_{p2}} \left[c_{p3} T_3 + (1 + \xi) \frac{V_3^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \right]. \quad (8)$$

Здесь выполняется условие вида

$$c_{p3} T_3 \gg (1 + \xi) \frac{V_3^2}{2} - \frac{V_2^2}{2},$$

что с учетом порядка величин c_{pi} , V_i и ξ позволяет прийти к примерному равенству

$$T_2 \approx T_3.$$

Это теоретически полученное соотношение свидетельствует о близости величин температуры перерабатываемого материала до и после матрицы экструдера. Из практики известно, что здесь имеет место достаточно высокая температура. Ее измерение в эксперименте является не побочным обстоятельством, а средством получения информации. Что можно априорно сказать о величине искомой температуры? Классическая термодинамика принципиально не может ответить на этот вопрос; ее интересует только внешнее проявление атомных процессов и обязательно в макросистемах [14]. Не исключено, что повышение температуры материала от T_1 до T_2 в канале экструдера вниз по энергонасыщенному потоку можно вычислить, исходя из анализа диссипативных процессов в условиях течения с противодействием. Возможно, что подобные задачи можно решить методами статистической термодинамики с учетом объемной теплоемкости $c_p \rho$ и температуропроводности a , перерабатываемых путем экструдирования материалов.

Результаты. В качестве исходного материала принято дробленое зерно озимой ржи. Проведен ее входной и выходной (после экструдирования) контроль на основе стандартных методик с использованием измерительных приборов. Результаты измерения объемной теплоемкости $c_{p\rho}$ озимой ржи в зависимости от ее влажности и температуры t приведены на рисунке.

Натурные эксперименты по экструдированию дерти зерна озимой ржи проведены на шнековом экструдере лаборатории Института механики сплошных сред УрО РАН. Для дан-

ного экструдера нами и была выше предпринята попытка проведения количественной оценки рабочего давления p_2 .

Установлено [15], что экструдер с приведенными выше конструктивными параметрами, работающий на режимных параметрах: влажность дерти ржи $23 \pm 2\%$, температура $130 \pm 5^\circ$, давление перед матрицей $3,2 \dots 4,0$ МПа, частота вращения шнека 150 мин^{-1} , обеспечивает повышение в среднем содержания свободной глюкозы с $70,8$ до $180,8$ мг% и свободного аминокислота с $2,6$ до $3,8$ мг%.

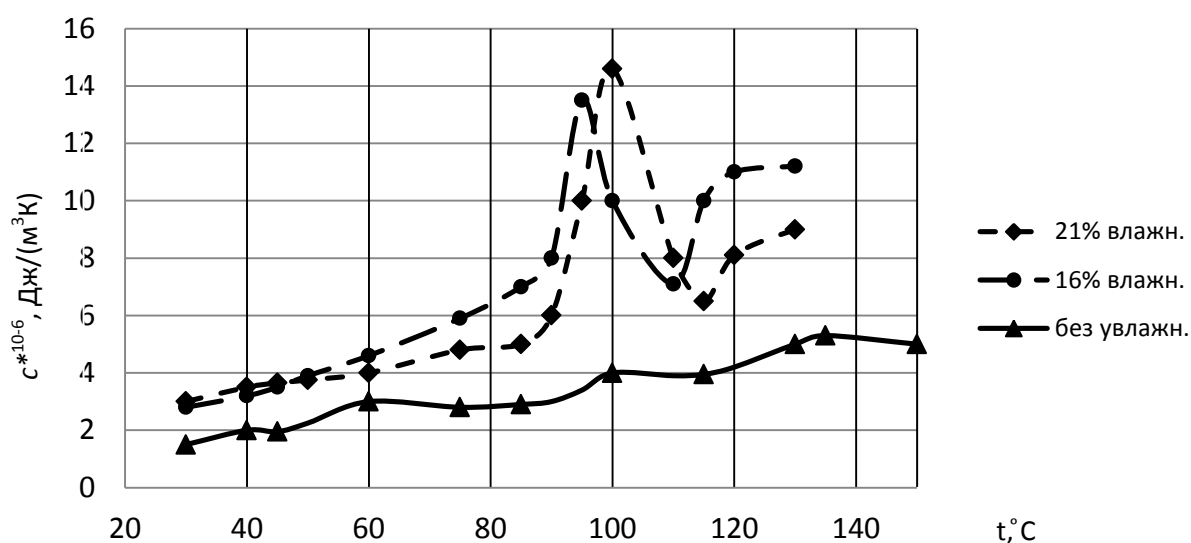


Рис. Температурные кривые объемной теплоемкости $c_{p\rho}$ спрессованной дерти озимой ржи (по данным ИМСС УрО РАН)

Производственный эксперимент проведен в ООО «Семеновское» Агрохолдинга «Ашатли» Пермского края под руководством профессоров Е. В. Славнова и В. А. Ситникова при участии сотрудников Пермского ГАТУ и отдела животноводства Пермского НИИСХ. По результатам производственных исследований рекомендовано использовать экструдированную рожь для кормления дойных коров без ограничений [8–11]. При этом молочная продуктивность не уменьшилась, а даже несколько выросла, а также улучшилось физиологическое состояние животных, что оценивалось по составу крови животных [8]. Себестоимость же рациона кормов несколько снизилась за счет использования сырья меньшей стоимости.

Выводы. 1. Предложена аналитическая зависимость для вычисления величины при-

ращения давления $\Delta p = p_2 - p_{\text{атм}}$ в проточном канале шнекового экструдера.

Применительно к экструдеру конструкции ИМСС УрО РАН на основе полученной аналитической зависимости проведена оценка величины давления перед матрицей при переработке дерти озимой ржи на корм. Результат проведенной количественной оценки согласуется по порядку величины с результатами измерения давления при работе экструдера.

2. Теоретически показано, что температура потока материала перед матрицей экструдера практически равна температуре материала на выходе из матрицы. Это подтверждается результатами натурного измерения. Однако вопрос аналитического определения температуры экструдирования растительного сырья требует отдельного рассмотрения.

Литература

1. Зверкова З. Н. Использование зерна озимой ржи в кормлении крупного рогатого скота // Кормопроизводство. 2008. № 9. С. 24–25.
2. Коробов А., Мишанин А. Эффективность использования экструзионной ржи в рационах свиней на откорме // Свиноводство. 2005. №2. С. 17–18.
3. Наноструктурные изменения зерна озимой ржи в процессе экструзии / Е. В. Славнов [и др.] // Аграрный вестник Урала. 2010. № 5. С. 75–78.
4. Остриков А. Н., Абрамов О. В., Рудометкин А. С. Экструзия в пищевой технологии. СПб.: ГИОРД, 2004. 288 с.
5. Пепеляева Е. В., Трутнев М. А. Влияние параметров экструзионной переработки на содержание свободной глюкозы в зерне озимой ржи // Научно-практический журнал «Пермский аграрный вестник». 2013. № 4(4). С. 28–32.
6. Berglung P. T., Fastnaught C. E., Holm E. T. Physico-chemical and sensory analysis of extruded high-fiber barley cereals // cereal. Chem. 1994. No. 1. P. 91–95.
7. Harper J. M. Extrusion processing of food products // Food Technology. 1978. V. 32. 27 s.
8. Производство и скармливание экструдированного зерна озимой ржи: рекомендации / В.А. Ситников [и др.]; М-во с.-х. Пермского края, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, Гос. науч. учреждение «Пермский науч.-исслед. ин-т с.-х.» Россельхозакадемии. Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2012. 32 с.
9. Ситников В. А., Морозков Н. А. Использование зерна озимой ржи экструзионной обработки в кормлении коров: монография; М-во с.-х. РФ, федеральное гос. бюджетное образов. учреждение высшего образования «Пермская гос. с.-х. акад. им. акад. Д. Н. Прянишникова». Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2016. 134 с.
10. Ситников В. А., Морозков Н. А., Славнов Е. В. Нетрадиционный способ подготовки концентрированных кормов и результаты скармливания их животным // Аграрный вестник Урала. 2008. №3. С. 52–55.
11. Славнов Е. В., Коробов В. П., Лемкина Л. М. Получение концентрированных кормовых добавок экструзионной обработкой зерна озимой ржи с оценкой пищевой ценности // Аграрный вестник Урала. 2008. № 3. С. 80–83.
12. Tadmor Z., Klein I. Engineering principles of plasticating extrusion. Krieger, 1970. 500 p.
13. Тарг С. М. Основные задачи теории ламинарных течений. М. – Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. 420 с.
14. Минаев А. М., Мордасов Д. М., Бадилова Н. Б. Термодинамика в материаловедении. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015, 80 с.
15. Пепеляева Е. В. Повышение эффективности процесса экструдирования зерна озимой ржи путем оптимизации технологических параметров и режимов работы экструдера: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Пермь, 2017. 158 с.

TO ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE PARAMETERS OF SCREW EXTRUDER

E. V. Pepelyaeva, Cand. Eng.Sci.,

V. S. Koshman, Cand. Eng. Sci., Associate Professor

Perm State Agro-Technological University

23, Petropavlovskaya St, Perm 614990 Russia

E-mail: tsat@pgsha.ru

ABSTRACT

In modern economic conditions, the search for reserves to increase milk productivity of dairy cows and in the midst of the Perm region has a high practical value. As a result of the search of scientific-research works by domestic and foreign researchers it was found that in this way a special interest represents the extrusion plant raw materials (cereals), with a view to their processing into animal feed. In heat-stressed conditions of extrusion, important biochemical changes in the depths of nutrients occur in cereals: dextrinization of starch to glucose, the change in the structure of the fiber, sterilization of food, improve their palatability. That significantly affects their achieved the effect at feeding. The study in the work focused on conservation of mass of a substance, Newton's second law and the law of conservation and transformation of energy. This made it possible to establish the relationship between parameters of grain-flow in ventilator channel of the screw extruder. These relationships are expressed by equations of consumption and changing of movement quantity, with taking into account the dependence of flow parameters of design features and parameters of extruders as energy machines. The paper presents the results of quantitative assessment of the pressure depending on design parameters of screw extruders. Forecast results meet the pressure values observed in practice. Results of the pilot study on extrusion process of winter rye are presented in the paper.

Key words: extrusion of cereal, screw extruder, mass flow equation, equation of momentum, energy equation.

References

1. Zverkova Z. N. Ispol'zovanie zerna ozimoi rzhi v kormlenii krupnogo rogatogo skota (Use of winter rye grain for feeding the cattle), *Kormoproizvodstvo*, 2008, No. 9, pp. 24–25.
2. Korobov A., Mishanin A. Effektivnost' ispol'zovaniya ekstruzionnoi rzhi v ratsionakh svinei na otkorme (Efficiency of extruded rye in diets of fattened swine), *Svinovodstvo*, 2005, No.2, pp. 17–18.
3. Slavnov E. V. et al. Nanostrukturnye izmeneniya zerna ozimoi rzhi v protsesse ekstruzii (Changes in winter rye grain nanostructure caused by extrusion), *Agrarnyi vestnik Urala*, 2010, No. 5, pp. 75–78.
4. Ostrikov A. N., Abramov O. V., Rudometkin A. S. Ekstruziya v pishchevoi tekhnologii (Extrusion in food technology), Saint-Petersburg, GIORD, 2004, 288 p.
5. Pepelyaeva E. V., Trutnev M. A. Vliyanie parametrov ekstruzionnoi pererabotki na sodержanie svobodnoi glyukozy v zerne ozimoi rzhi (Impact of extrusion processing parameters on content of free glucose in winter rye grain), *Nauchno-prakticheskii zhurnal «Permskii agrarnyi vestnik»*, 2013, No. 4(4), pp. 28–32.
6. Berglung P. T., Fastnaught C. E., Holm E. T. Physico-chemical and sensory analysis of extruded high-fiber barley cereals, *cereal., Chem.*, 1994, No. 1, pp. 91–95.
7. Harper J. M. Extrusion processing of food products, *Food Technology*, 1978, V. 32, 27 p.
8. V. A. Sitnikov et al. Proizvodstvo i skarmlivanie ekstrudirovannogo zerna ozimoi rzhi: rekomendatsii (Production and feeding of extruded grain of winter rye: guidelines), M-vo s.-kh. Permskogo kraya, FGBOU VPO Permskaya GSKhA, Gos. nauch. uchrezhdenie «Permskii nauch.-issled. in-t s.-kh.» Rossel'khozakademii, Perm', Izd-vo FGBOU VPO Permskaya GSKhA, 2012, 32 p.
9. Sitnikov V. A., Morozkov N. A. Ispol'zovanie zerna ozimoi rzhi ekstruzionnoi obrabotki v kormlenii korov : monografiya (Extruded winter rye grain for feeding cows), M-vo s.-kh. RF, federal'noe gos. byudzhethoe obrazov. uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Permskaya gos. s.kh. akad. im. akad. D. N. Pryanishnikova», Perm', PTs «Prokrost'», 2016, 134 p.
10. Sitnikov V. A., Morozkov N. A., Slavnov E. V. Netraditsionnyi sposob podgotovki kontsentrirrovannykh kormov i rezul'taty skarmlivaniya ikh zhivotnym (Non-conventional way to prepare concentrated fodders and results of feeding them to animals), *Agrarnyi vestnik Urala*, 2008, No.3, pp. 52–55.
11. Slavnov E. V., Korobov V. P., Lemkina L. M. Poluchenie kontsentrirrovannykh kormovykh dobavok ekstruzionnoi obrabotkoi zerna ozimoi rzhi s otsenkoi pishchevoi tsennosti (Receiving of concentrated fodder additives by extrusion processing of winter rye grain with assessment of nutritional value), *Agrarnyi vestnik Urala*, 2008, No. 3, pp. 80–83.
12. Tadmor Z., Klein I. Engineering principles of plasticating extrusion., Krieger, 1970, 500 p.
13. Targ S. M. Osnovnye zadachi teorii laminarnykh techenii (General tasks of streamline flow theory), Moscow – Leningrad, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury, 1951, 420 p.
14. Minaev A. M., Mordasov D. M., Badirova N. B. Termodinamika v materialovedenii (Thermodynamics and material science), Tambov, Izd-vo TGTU, 2015, 80 p.
15. Pepelyaeva E. V. Povyshenie effektivnosti protsesssa ekstrudirovaniya zerna ozimoi rzhi putem optimizatsii tekhnologicheskikh parametrov i rezhimov raboty ekstrudera (The Increase of grain extrusion process of winter rye by the optimization of technological parameters and duty cycle of extrusion machine), dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01, Perm', 2017, 158 p.