

Влияние технологических параметров экструзии на прочностные свойства экструдатов на основе ячменя

Фролов Д.И., Кручинина Н.Э.

Аннотация. Экструдированные закуски на основе ячменя, содержащие тыкву и чечевицу, получали с использованием одношнекового экструдера. Методология поверхности отклика использовалась для оптимизации и оценки влияния трех независимых переменных, а именно: состав смеси (50-90% ячменной муки; 2-42% чечевичной муки и 8% тыквенной муки), содержание влаги (13% -21%) и температура цилиндра (115-155 °С). Переменными отклика были: удельная механическая энергия (УМЭ), объемная плотность (В), коэффициент расширения (КР), твердость. Было обнаружено, что низкая температура цилиндра и низкое содержание влаги увеличивают поперечное расширение экструдата, тогда как низкое содержание ячменя значительно снижает поперечное расширение экструдатов. Более высокое содержание влаги свидетельствует о положительном влиянии на твердость экструдата, тогда как повышенное содержание ячменя значительно снижает твердость. Более низкие значения объемной плотности наблюдались при более низких значениях влажности. Удельная механическая энергия экструдатов на основе ячменя составляла от 750,5 до 1097 кДж/кг, при низком содержании влаги наблюдалось значительное снижение удельной механической энергии.

Ключевые слова: термовакуумная экструзия, ячмень, тыква, чечевица, коэффициент расширения.

Для цитирования: Фролов Д.И., Кручинина Н.Э. Влияние технологических параметров экструзии на прочностные свойства экструдатов на основе ячменя // Инновационная техника и технология. 2021. Т. 8. № 1. С. 16–21.

Influence of technological parameters of extrusion on the strength properties of barley-based extrudates

Frolov D.I., Kruchinina N.E.

Abstract. Extruded barley based snacks containing pumpkin and lentils were prepared using a single screw extruder. The response surface methodology was used to optimize and evaluate the effect of three independent variables, namely: mix composition (50-90% barley flour; 2-42% lentil flour and 8% pumpkin flour), moisture content (13% -21%), and temperature cylinder (115-155 ° C). The response variables were: specific mechanical energy (MSE), bulk density (B), expansion coefficient (CR), hardness. It has been found that a low barrel temperature and low moisture content increase the lateral expansion of the extrudate, while a low barley content significantly reduces the lateral expansion of the extrudates. A higher moisture content indicates a positive effect on the hardness of the extrudate, while a higher barley content significantly reduces the hardness. Lower bulk density values were observed at lower moisture values. The specific mechanical energy of the barley-based extrudates ranged from 750.5 to 1097 kJ / kg, with a low moisture content, a significant decrease in the specific mechanical energy was observed.

Keywords: thermal vacuum extrusion, barley, pumpkin, lentil, expansion coefficient.

For citation: Frolov D.I., Kruchinina N.E. Influence of technological parameters of extrusion on the strength properties of barley-based extrudates. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2021. Vol. 8. No. 1. pp. 16–21. (In Russ.).

Введение

Зерновые злаки обычно используются в качестве основного сырья для изготовления экструдированных закусок и содержат мало белков и обладают низкой биологической ценностью из-за ограниченного содержания незаменимых аминокислот [1, 2]. Ячмень является четвертой по значимости зерновой культурой в мире после пшеницы, кукурузы (кукурузы) и риса. Ячмень является наиболее важной культурой для кормления скота, а также основным ингредиентом пива и других солодовых напитков [3, 4, 5, 6].

Научные данные показывают, что включение ячменя в здоровый рацион может помочь снизить риск ишемической болезни сердца за счет снижения уровня липопротеинов низкой плотности и общего холестерина [7]. Он обладает превосходными питательными качествами благодаря наличию бета-глюкана (антихолестериновое вещество), ацетилхолина (вещество, которое питает нашу нервную систему и восстанавливает потерю памяти), легкой усвояемости (благодаря низкому содержанию глютену) и высокому содержанию лизина, тиамина и рибофлавина [8].

Чечевица - один из первых одомашненных видов растений, такой же старый, как кукуруза, пшеница, ячмень и горох. Благодаря высокому среднему содержанию белка и быстрому приготовлению чечевица является наиболее популярным бобовым во многих регионах. Солома чечевицы также является ценным кормом для животных из-за низкого содержания целлюлозы. Белок бобовых является естественным белком, подходящим для дополнения содержания белка, присутствующего в зернах злаков, и, с другой стороны, зерна бобовых являются важной частью рациона человека. Второстепенные соединения бобовых - липиды, полифенолы и биоактивные пептиды.

Тыква широко выращивается во всем мире. Тыква - отличный источник бета-каротина. Попадая в организм, этот каротиноид превращается в витамин А.

Применение термовакуумной экструзии растительного сырья позволит значительно интенсифицировать процесс без применения высокой температуры, что в свою очередь обеспечит сохранность полезных ингредиентов сырья и получение высококачественных композитов [9-12]. Во многих исследованиях сообщалось о влиянии различных переменных процесса и конфигурации экструдера на свойства различных смесей экструдатов [13-16].

Целью исследования было составить экструдированный продукт на основе ячменя, чечевицы и тыквы с исследованием его удельной механической энергии, объемной плотности и коэффициента расширения.

Объекты и методы исследования

Ячмень и чечевица, закупались на местном рынке и измельчались мельницей в мелкий порошок. Тыкву сушили в сушилке горячим воздухом при температуре 70 °С и измельчали в миксере в муку мелкого помола. Все три вида муки просеивали через сито (200 мкм).

Состав смеси был сделан путем смешивания ячменя, чечевицы и тыквы. Содержание тыквы оставалось постоянным (8%) во всех пяти обработках. Содержание ячменя изменялось от 50 до 90%, чечевицы от 2 до 42%. Все ингредиенты взвешивали отдельно и просеивали через сито, перемешивали и хранили для дальнейшего использования.

При выполнении работы были использованы общепринятые стандартные методы исследований.

Все эксперименты по экструзии проводили с использованием одношнекового лабораторного экструдера ЭК-40 (диаметр шнека 40 мм) с использованием фильеры диаметром 3 мм.

Физико-химические характеристики экструдированных продуктов.

Значения удельной механической энергии (УМЭ), были записаны после достижения устойчивого состояния. Коэффициент расширения (КР) определяли как отношение между диаметром экструдатов (измеренным с помощью цифрового штангенциркуля) и диаметром отверстия фильеры экструдера (0,3 мм). Выбиралось среднее значение шести измерений.

Объемная плотность (В) определялась путем взвешивания количества экструдатов, необходимых для заполнения контейнера емкостью 500 мл, и выражалась в г/см³.

Твердость определяли путем измерения максимального усилия, необходимого для разрушения экструдатов. Выбиралось среднее значение не менее трех измерений.

Программа Statistica 10 была использована для составления плана эксперимента, проведения статистического анализа и использовалась для разработки, оценки эффектов и получения поверхностей отклика.

Центральное композиционное планирование эксперимента использовалось для оценки влияния

Таблица 1 – Значения независимых переменных в закодированной форме

Независимые переменные		Уровни в закодированной форме				
		-1,68	-1	0	1	1,68
Состав смеси (соотношение)	Mix	50:42:8	60:32:8	70:22:8	80:12:8	90:02:8
Содержание влаги (%)	W	13	15	17	19	21
Температура цилиндра (° C)	T	115	125	135	145	155

Таблица 2 – Дисперсионный анализ соответствия экспериментальных данных моделям поверхности отклика

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (2**(3) центр. комп. план, nc=8 ns=6 n0=2 Опыт=16									
	Множеств R	Множеств R2	SS Модель	Cc Модель	MS Модель	SS Остаток	Cc Остаток	MS Остаток	F	p
УМЭ (кДж/кг)	0,985	0,971	236916	9	26324	7101,761	10	710,176	37,067	0,000
В (г/см ³)	0,921	0,849	0	9	0	0,005	10	0,001	6,248	0,004
КР	0,990	0,980	2339,2	9	259,91	48,722	10	4,872	53,347	0
Твердость, (Н)	0,899	0,808	14673,7	9	1630,41	3481,384	10	348,138	4,683	0,012

Таблица 3 – Влияние условий обработки на характеристики экструдатов на основе ячменя с добавлением чечевицы и тыквы

Состав смеси Mix (%) (Ячм :Чеч:Тык)	Содержание влаги W (%)	Температура цилиндра T (°C)	УМЭ (кДж/кг)	В (г/см ³)	КР	Твердость, (Н)
-1	-1	-1	1097	0,08	42,4	240,49
-1	-1	1	1178,8	0,09	68	217,49
-1	1	-1	818,1	0,15	37	301,18
-1	1	1	795,9	0,098	49	275,89
1	-1	-1	1014,2	0,039	70,8	181,41
1	-1	1	977	0,083	69,8	261,45
1	1	-1	899,2	0,18	54,6	261,66
1	1	1	843,2	0,18	49,54	256,87
-1,68	0	0	1046	0,125	46	264,34
1,68	0	0	926,2	0,142	68,4	226,43
0	-1,68	0	1176,3	0,07	72	214,68
0	1,68	0	750,5	0,161	39,32	289,99
0	0	-1,68	920	0,13	45	245,15
0	0	1,68	946,5	0,074	62,2	262,13
0	0	0	1022,8	0,142	64,6	212,57
0	0	0	958,1	0,166	61,31	211,34
0	0	0	989	0,11	63,21	247,92
0	0	0	1022,8	0,142	64,6	212,57
0	0	0	958,1	0,166	60,02	211,34
0	0	0	989	0,11	63,23	262,13

Mix (%) – состав смеси (Ячм – ячмень; Чеч – чечевица; Тык – тыква); W (%) – содержание влаги; T (°C) – температура цилиндра; УМЭ (кДж/кг) – удельная механическая энергия, В (г/см³) – объемная плотность; КР – коэффициент расширения.

переменных процесса экструзии на удельную механическую энергию и физические свойства экструдатов.

Результаты и их обсуждение

Независимыми переменными, выбранными для эксперимента, были: пропорции смеси (ячменная мука: чечевичная мука: тыквенная мука) (Mix) – (50: 42: 8, 60: 32: 8, 70: 22: 8, 80: 12: 8, 90: 2: 8); содержание влаги (W), 13, 15, 17, 19 и 21%, и температура цилиндра (T), 115, 125, 135, 145 и 155 °C.

Переменными отклика были: удельная механическая энергия (УМЭ), объемная плотность (В), коэффициент расширения (КР), твердость.

Модели для всех параметров были значимыми, и на все параметры значительно влияли включения чечевицы и тыквы, влажность и температура цилиндра. Ни одна из моделей не показала значительного отсутствия соответствия, что указывает на то, что все полиномиальные модели второго порядка коррелировали с измеренными данными. Достаточно хороший коэффициент детерминации (R² = 0,97; 0,85; 0,98; 0,81) для удельной механической

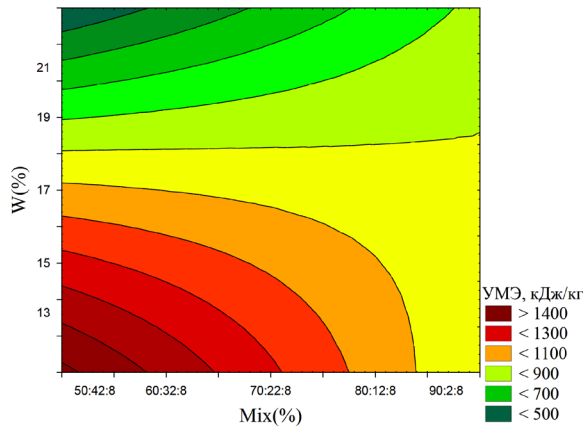


Рис. 1. Влияние состава смеси и влажности на удельную механическую энергию экструдатов ячменя с добавлением чечевицы и тиквы

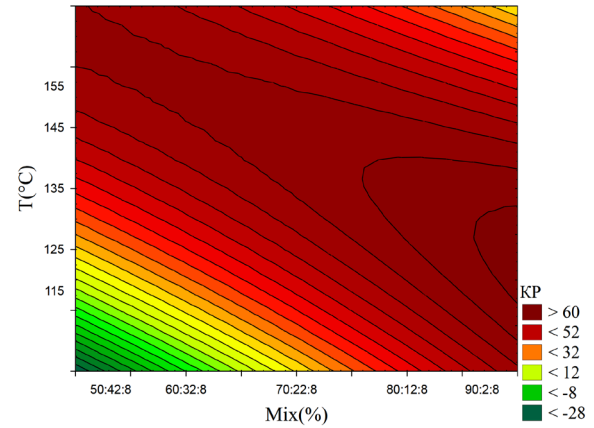


Рис. 3. Влияние состава смеси и температуры цилиндра на коэффициент расширения экструдатов ячменя, содержащих чечевицу и тикву

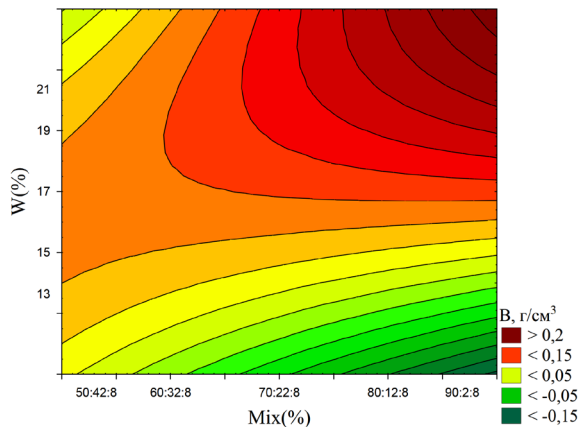


Рис. 2. Влияние состава смеси и содержания влаги на объемную плотность экструдатов ячменя, содержащих чечевицу и тикву

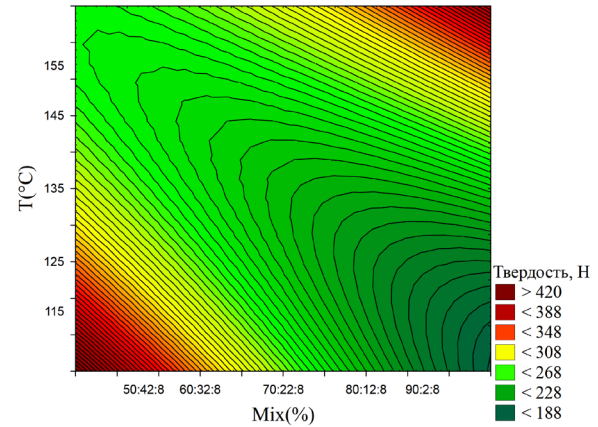


Рис. 4. Влияние состава смеси и температуры цилиндра на твердость экструдатов ячменя с добавлением чечевицы и тиквы

ской энергии, объемной плотности, коэффициента расширения и твердости показал, что полученные модели оказались адекватными. Прогнозируемый R-квадрат оказался в разумном согласии с скорректированным R-квадратом для всех параметров.

Средние значения УМЭ при различных условиях экструзии, перечисленные в таблице 3, находились в диапазоне от 750,5 до 1097 кДж/кг. Регрессионный анализ и графики поверхности отклика (рис. 1) показали отрицательное влияние состава и влажности смеси и положительное влияние температуры цилиндра. Во время экструзии, чем выше УМЭ, тем выше степень желатинизации, поскольку механическая энергия способствует желатинизации, способствуя разрыву межмолекулярных водородных связей.

Максимальная объемная плотность ($0,18 \text{ г/см}^3$) экструдатов была примерно в 4,5 раза больше, чем минимальная объемная плотность ($0,039 \text{ г/см}^3$), а среднее значение объемной плотности составляло $0,121 \text{ г/см}^3$. Что показало положительную связь состава смеси и содержания влаги, а также обратную

зависимость температуры от объемной плотности. Повышенное содержание влаги в сырье во время экструзии может снизить эластичность теста из-за пластификации расплава, поэтому уменьшение желатинизации увеличивает плотность экструдата.

Среднее значение коэффициента расширения при различных условиях экструзии, перечисленных в таблице 3, варьировалось от 37 до 70. Регрессионный анализ и графики поверхности отклика (рис. 3) показали положительное влияние состава и температуры, а также отрицательное влияние влаги на коэффициент расширения. Высокий вклад тепловой энергии из-за большого времени пребывания приводит к созданию повышенного уровня перегретого пара, что приводит к хорошему расширению, которое создает прозрачные и пористые структуры из-за образования воздушных ячеек. Когда происходит экструзия приготовленных продуктов и они выходят на выход из фильеры, они внезапно переходят с высокого давления на атмосферное. Это падение давления вызывает испарение внутренней влаги и давления водяного пара, которые зарождаются с об-

разованием пузырьков в расплавленном экструдате, что способствует расширению расплава.

Максимальная твердость экструдата (325,77 Н) была примерно в 1,8 раза больше, чем минимальная твердость (178,71 Н). Среднее значение прочности на разрыв составило (242,89 Н). Регрессионный анализ и графики поверхности отклика (рис. 4) показали отрицательное влияние состава смеси и содержания влаги, а также положительное влияние температуры цилиндра.

Литература

- [1] Nutritional quality of important food legumes / A. Iqbal, I.A. Khalil, N. Ateeq, M. Sayyar Khan // *Food Chemistry*. 2006. Vol. 97. № 2. P. 331–335.
- [2] Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов и пищевых волокон / А.А. Курочкин, П.К. Воронина, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // *Техника и технология пищевых производств*. 2016. № 3 (42). С. 104–111.
- [3] The effects of concentrated barley β -glucan on blood lipids in a population of hypercholesterolaemic men and women / J.M. Keenan [et al.] // *British Journal of Nutrition*. 2007. Vol. 97. № 6. P. 1162–1168.
- [4] Перспективы использования экструдированной гречихи в пивоварении и хлебопечении / Г.В. Шабурова, П.К. Воронина, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014. № 4. С. 79–83.
- [5] Оптимизация состава зернопродуктов при получении пивного сусла с использованием экструдированного ячменя / Г.В. Шабурова, А.А. Курочкин, П.К. Воронина, Д.И. Фролов // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2014. № 6 (22). С. 103–109.
- [6] Технологические аспекты регулирования выхода экстракта при получении пивного сусла / П.К. Гарькина, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2020. Т. 8. № 2. С. 13–20.
- [7] The position of functional foods and supplements with a serum LDL-C lowering effect in the spectrum ranging from universal to care-related CVD risk management / S. Baumgartner, E. Bruckert, A. Gallo, J. Plat // *Atherosclerosis*. 2020. Vol. 311. P. 116–123.
- [8] Proteomics reveals commitment to germination in barley seeds is marked by loss of stress response proteins and mobilisation of nutrient reservoirs / S.K. Osama [et al.] // *Journal of Proteomics*. 2021. Vol. 242. P. 104221.

Выводы

Зерно злаков обычно используется в качестве основного сырья в экструдированных закусках. Чтобы повысить пищевую ценность экструдатов на основе ячменя, была сделана попытка включить в экструдаты чечевицу и тыкву. Одношнековый экструдер использовался для производства экструдатов в различных условиях: состав смеси (50-90% ячменной муки; 2-42% чечевичной муки и 8% тыквенной муки), содержание влаги 13-21% и температура цилиндра 115-155 °С. Было обнаружено, что коэффициент расширения экструдатов уменьшался с увеличением температуры цилиндра и содержания ячменя.

References

- [1] Nutritional quality of important food legumes / A. Iqbal, I.A. Khalil, N. Ateeq, M. Sayyar Khan // *Food Chemistry*. 2006. Vol. 97. № 2. P. 331–335.
- [2] Extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids and food fibers / A.A. Kurochkin, P.K. Voronin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // *Technics and technology of food production*. 2016. No. 3 (42). pp. 104-111.
- [3] The effects of concentrated barley β -glucan on blood lipids in a population of hypercholesterolaemic men and women / J.M. Keenan [et al.] // *British Journal of Nutrition*. 2007. Vol. 97. № 6. P. 1162–1168.
- [4] Prospects for the use of extruded buckwheat in brewing and baking / G.V. Shaburov, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy*. 2014. No. 4. pp. 79–83.
- [5] Optimization of the composition of grain products when obtaining beer wort using extruded barley / G.V. Shaburova, A.A. Kurochkin, P.K. Voronin, D.I. Frolov // *XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2014. No. 6 (22). pp. 103-109.
- [6] Technological aspects of regulating the yield of the extract when obtaining beer wort / P.K. Garkina, A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. No. 2. pp. 13–20.
- [7] The position of functional foods and supplements with a serum LDL-C lowering effect in the spectrum ranging from universal to care-related CVD risk management / S. Baumgartner, E. Bruckert, A. Gallo, J. Plat // *Atherosclerosis*. 2020. Vol. 311. P. 116–123.
- [8] Proteomics reveals commitment to germination in barley seeds is marked by loss of stress response proteins and mobilisation of nutrient reservoirs / S.K. Osama [et al.] // *Journal of Proteomics*. 2021. Vol. 242. P. 104221.
- [9] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Zimnyakov V.M. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 640. № 7. P. 072018.

- [9] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Zimnyakov V.M. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 640. № 7. P. 072018.
- [10] Рациональные технологические параметры при производстве поликомпонентного композита на основе семян льна / В.М. Зимняков, О.Н. Кухарев, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // Нива Поволжья. 2017. № 4 (45). С. 157–163.
- [11] Регулирование структуры экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. № 4. С. 94–99.
- [12] Теоретическое обоснование термовакuumного эффекта в рабочем процессе модернизированного экструдера / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 15–20.
- [13] Курочкин А.А., Фролов Д.И., Воронина П.К. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4 (32). С. 172–177.
- [14] Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического решения / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Нива Поволжья. 2014. № 30. С. 70–76.
- [15] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д.И. Фролов [и др.] // Нива Поволжья. 2019. № 2 (51). С. 134–143.
- [16] Потапов М.А., Фролов Д.И., Курочкин А.А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. Т. 5. № 4. С. 42–48.
- [10] Rational technological parameters in the production of a multicomponent composite based on flax seeds / V.M. Zimnyakov, O. N. Kukharev, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // Niva Volga region. 2017. No. 4 (45). pp. 157-163.
- [11] Regulation of the structure of extrudates of starch-containing grain raw materials / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // News of the Samara State Agricultural Academy. 2013. No. 4. pp. 94–99.
- [12] Theoretical substantiation of the thermal vacuum effect in the working process of the modernized extruder / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // News of the Samara State Agricultural Academy. 2015. No. 3. pp. 15–20.
- [13] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Voronina P.K. Determination of the main parameters of the vacuum chamber of the modernized extruder // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2015. No. 4 (32). pp. 172-177.
- [14] Modeling the process of extrudates production based on a new technological solution / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // Niva of the Volga region. 2014. No. 30, pp. 70–76.
- [15] Increasing the efficiency of extrudate dehydration in the vacuum chamber of the modernized extruder / D.I. Frolov [and others] // Niva of the Volga region. 2019. No. 2 (51). pp. 134-143.
- [16] Potapov M.A., Frolov D.I., Kurochkin A.A. Optimization of the number of holes in the die of a single-screw extruder for processing poultry manure // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. 2020. T. 5. No. 4. pp. 42–48.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>
<p>Кручинина Наталья Эдуардовна аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(965) 633-85-85 E-mail: kruchininane@gmail.com</p>	<p>Kruchinina Natalia Eduardovna postgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(965) 633-85-85 E-mail: kruchininane@gmail.com</p>