

Изучение влияния факторов экструзионного процесса на индекс расширения экструдата из кукурузы

Фролов Д.И., Чистякова Е.А.

Аннотация. Исследование направлено на изучение эффектов процесса экструзии и характеристик экструдата из кукурузы с добавлением соевого остатка. Смесь кукурузной крупы и муки из соевых остатков экструдуют с помощью одношнекового экструдера для получения экструдата с высоким содержанием белка. Экспериментальное исследование было выполнено с использованием плана Бокса-Бенкена, а методология поверхности отклика была использована для оценки влияния на параметры экструзии, такие как индекс расширения экструдата (B) и плотность (D). В качестве факторов экструзии, влияющих на конечный продукт использовались скорость шнека (350–450 об/мин), содержание соевого остатка в смеси (20–40 %) и влажность смеси (14–18 %). Дисперсионный анализ показал, что наиболее значимыми переменными являются остаток сои, который оказывает отрицательное влияние на индекс расширения экструдата, и скорость шнека, которая оказывает положительное влияние на индекс расширения экструдата, в то время как влажность смеси незначительно влияла на эти характеристики.

Ключевые слова: кукуруза, пищевая экструзия, соя, соевый остаток, влажность смеси.

Для цитирования: Фролов Д.И., Чистякова Е.А. Изучение влияния факторов экструзионного процесса на индекс расширения экструдата из кукурузы // Инновационная техника и технология. 2020. № 1 (22). С. 23–28.

Study of the influence of extrusion process factors on the extrudate expansion index from corn

Frolov D.I., Chistyakova E.A.

Abstract. The study is aimed at studying the effects of the extrusion process and the characteristics of the extrudate from corn with the addition of soybean residue. A mixture of corn grits and flour from soy residues is extruded using a single screw extruder to obtain a high protein extrudate. An experimental study was performed using the Box-Benken plan, and the response surface methodology was used to evaluate the effect on extrusion parameters, such as extrudate expansion index (B) and density (D). As the extrusion factors affecting the final product, we used the screw speed (350–450 rpm), the content of soybean residue in the mixture (20–40 %) and the moisture content of the mixture (14–18 %). Analysis of variance showed that the most significant variables are soybean residue, which has a negative effect on the extrudate expansion index, and screw speed, which has a positive effect on the extrudate expansion index, while the moisture content of the mixture slightly affected these characteristics.

Keywords: corn, food extrusion, soy, soybean residue, mixture moisture.

For citation: Frolov D.I., Chistyakova E.A. Study of the influence of extrusion process factors on the extrudate expansion index from corn. Innovative Machinery and Technology. 2020. No.1 (22). pp. 23–28. (In Russ.).

Введение

Соевый остаток, является побочным продуктом переработки соевого молока. На каждый 1 кг семян сои можно получить около 2,5 кг свежего соевого остатка с содержанием влаги более 80 % [7].

Количество соевого остатка, производимого ежегодно, приводит к серьезной проблеме утилиза-

ции, большая часть которого сбрасывается и сжигается как отходы [8], хотя он является хорошим источником питательных веществ, особенно в отношении содержания белка. Следовательно, возможно использование соевого остатка в качестве пищи для человека.

Экструзионная технология является экономичным и широко распространенным методом обра-

Таблица 1 – Регрессионные модели

Параметр	Регрессионная модель	Коэффициент детерминации R ²	Значимость, p
B (см/см)	$B = 2,15 + 0,113X_1 - 0,343X_2 + 0,083X_3 - 0,014X_1X_2 - 0,013X_1X_3 - 0,045X_2X_3 - 0,052X_1^2 + 0,092X_2^2 - 0,045X_3^2$	0,95	<0,00
D (г/см ³)	$D = 0,327 - 0,025X_1 + 0,076X_2 - 0,01X_3 - 0,017X_1X_2 - 0,018X_1X_3 + 0,009X_2X_3 + 0,006X_1^2 - 0,004X_2^2 - 0,011X_3^2$	0,89	0,01

ботки пищевых продуктов, который включает процесс смешивания, варки и формования в течение короткого времени и при высокой температуре [14, 17, 18, 19, 20, 24].

Чтобы увеличить количество питательных веществ в экструдате на основе крахмалосодержащего сырья, можно добавлять растительные и фруктовые побочные продукты. Обычно сырьем, используемым в продукте на основе крахмала, являются пшеница, кукуруза, рис и картофель [3, 21, 23]. Некоторые исследования были направлены на добавление растительных или фруктовых побочных продуктов для улучшения экструдированных закусок, таких как побочный продукт переработки пива [5, 10, 11, 16].

Поэтому целью данного исследования является изучение влияния переменных экструзии, таких как скорость шнека, содержание остатка сои и влажность смеси, на характеристики экструдата из кукурузы, обогащенного остатком сои, включая индекс расширения экструдата и плотность.

Объекты и методы исследований

Свежий соевый остаток был приобретен у поставщика соевого молока. Свежий соевый остаток (88 % по массе) сушили при 60 °С в сушилке, измельчали с помощью молотковой мельницы и хранили при комнатной температуре. Кукурузная крупа была приобретена на сельскохозяйственном рынке.

Соевый остаток смешивали с кукурузной мукой в количестве 20, 30 и 40 % по массе и экструдировали с помощью одношнекового экструдера. Скорость шнека устанавливалась на уровнях 350, 400 и 450 об/мин, а температура экструзии была зафиксирована на уровне 100 °С. Влажность смеси была установлена на уровне 14 %, 16 % и 18 %. Затем экструдат сушили в сушилке при температуре 80 °С в течение 10 минут и упаковывали в полипропиленовый пластиковый пакет и хранили при комнатной температуре до анализа.

Индекс расширения экструдата (B) определялся путем измерения диаметра экструдата штангенциркулем. Случайным образом измерялись 10 образцов экструдата. Далее индекс расширения экструдата был рассчитан [1].

Плотность (D) определялась следующим обра-

зом: экструдаты разрезали на длину 4 см и 10 образцов экструдата были случайным образом взвешены, измеряли их фактический геометрический диаметр и длину, и произведен расчет плотности.

Эксперимент был выполнен с использованием трехуровневого трехфакторного плана Бокса-Бенкена с помощью методологии поверхности отклика в программе Statistica и Origin. Три независимых переменных включали скорость шнека (X₁, об/мин), содержание соевого остатка (X₂, %) и влажность смеси (X₃, %). Всего было проведено 15 экспериментов. Регрессионный анализ был выполнен для создания модели поверхности отклика. Для получения уравнения регрессии была использована полиномиальная модель второго порядка (уравнение 1) и исследована на предмет ее соответствия для описания поверхности отклика.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

где Y – B и D;

β_0 , β_{ii} и β_{ij} – постоянные коэффициенты;

X₁, X₂ и X₃ – кодированные независимые переменные.

Функции подгонки всех моделей были определены с использованием дисперсионного анализа.

Результаты и их обсуждение

Свежий остаток сои содержит 88 % влаги. После сушки при 60 °С с помощью сушилки и измельчения, высушенный остаток сои состоит из 11,54 % влаги и 22,43 % белка, тогда как кукурузная крупа состоит из 6,74 % влаги и 6,44 % белка. Содержание белка в экструдатах варьировалось от 9,61 до 12,82 %. Было оценено влияние трех различных уровней переменных экструзии на характеристики экструдата.

Индекс расширения экструдата (B) указывает на качество вспучивания экструдата [9]. Значения индекса расширения экструдата варьировались от 1,745 до 2,670. Таблица 1 показывает, что подобранная модель была нелинейной. Линейный эффект X₂ (содержание соевого остатка) (p < 0,00) отрицательно влияет на индекс расширения экструдата, в то

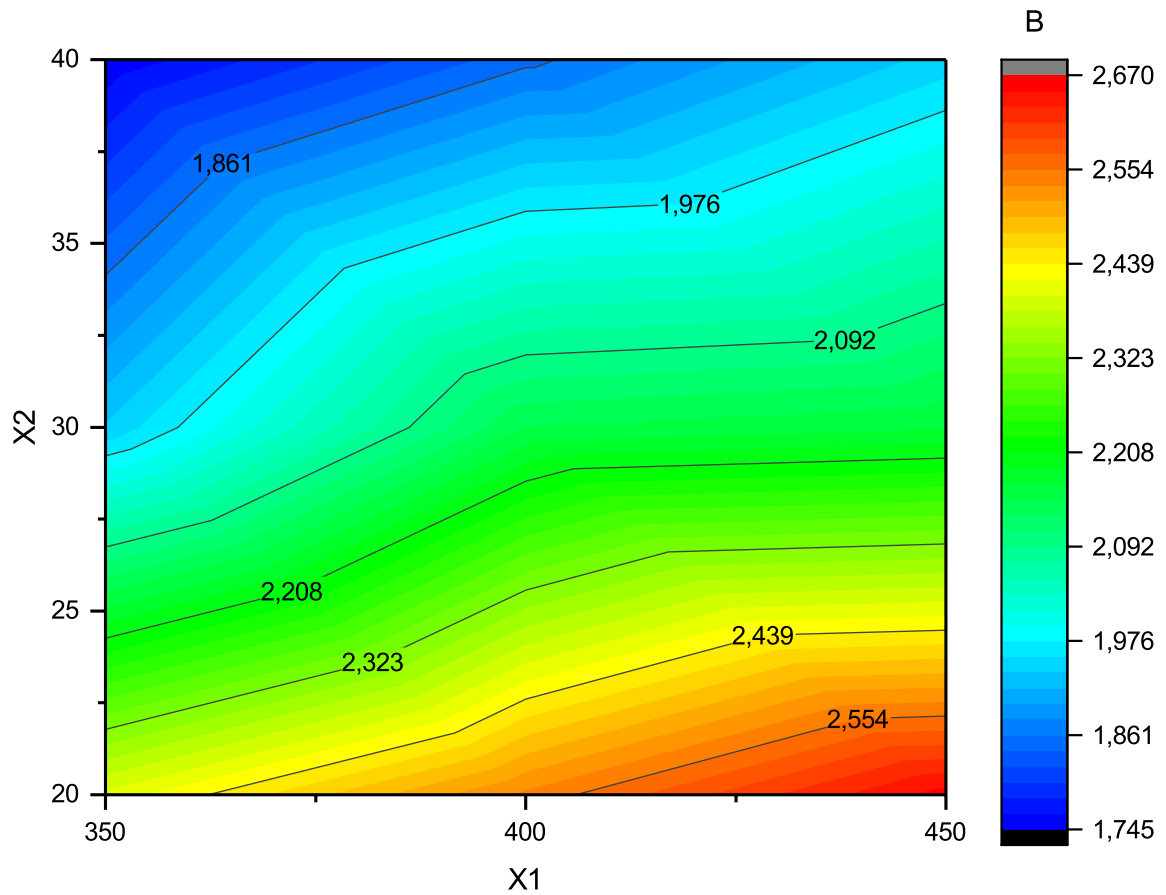


Рис. 1. Влияние переменных: скорость шнека (X1, об/мин) и содержание соевого остатка (X2, %) на индекс расширения экструдата (B, см/см)

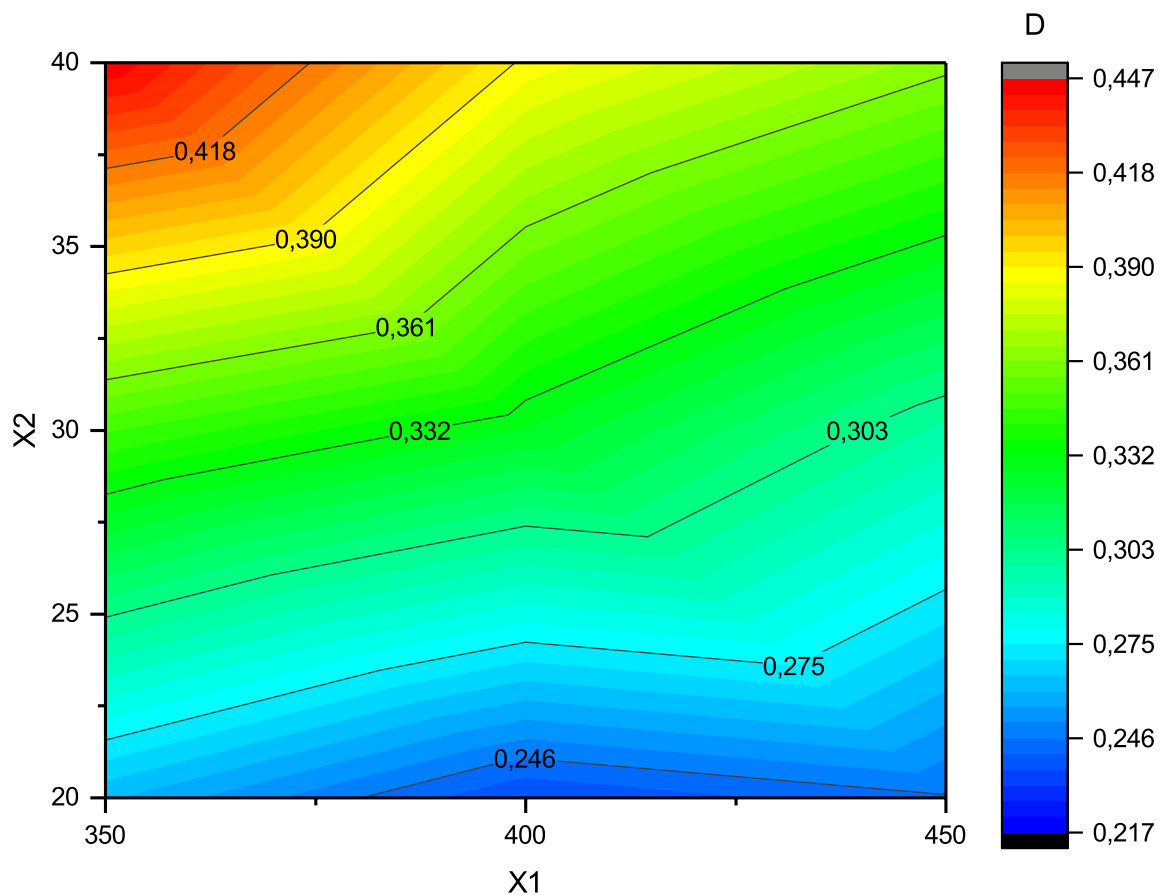


Рис. 2. Влияние переменных: скорость шнека (X1, об/мин) и содержание соевого остатка (X2, %) на плотность экструдата (D, г/см³)

время как скорость шнека ($p = 0,01$) и влажность смеси ($p = 0,05$) положительно влияют на индекс расширения экструдата. На рисунке 1 показано, что при влажности смеси 16 % индекс расширения экструдата снижается с увеличением содержания соевого остатка при изменении скорости шнека с 350 до 450 об/мин. Из-за присутствия волокон в соевом остатке в продукте предотвращается выброс испаряющегося пара, что приводит к расширению продукта [1]. Наблюдалось много результатов исследований где добавлялось сырье для уменьшенной степени расширения волокна в экструдатах [3]. Кроме того, в исследованиях сообщалось, что взаимодействия крахмал-белок также оказывали отрицательное влияние на индекс расширения экструдата, в то время как скорость шнека оказывала положительное влияние на индекс расширения экструдата [2, 6]. Влажность смеси снижалась с уменьшением индекса расширения экструдата экструдированных продуктов. Низкая влажность в смеси может привести к малому испарению воды, что приведет к снижению индекса расширения экструдата [9].

Значения плотности (D) варьировались от 0,217 до 0,447 г/см³. В таблице 1 показано, что линейный член в уравнении регрессии X_1 оказывал

положительное влияние ($p < 0,00$), в то время как скорость шнека ($p = 0,06$) оказывала отрицательное влияние на плотность. Увеличение влажности смеси с 20 до 40 % увеличивало плотность. Более того, увеличение скорости шнека уменьшало значение плотности при определенном уровне содержания соевого остатка (рис. 2). Можно объяснить, что волокно имеет тенденцию разрушать клеточные стенки до того, как пузырьки воздуха расширились, поэтому максимальное расширение продукта было предотвращено [4, 13, 15, 22]. Такие же результаты влияния скорости шнека на плотность наблюдались у других исследователей [12]. Данные показывают, что плотность отрицательно коррелировала с индексом расширения экструдата.

Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что содержание остатка сои и скорость шнека значительно влияли на характеристики экструдата. Остаток сои оказал значительное влияние на индекс расширения экструдата, в то время как скорость шнека оказала значительное влияние на индекс расширения экструдата и плотность.

Список литературы

- [1] Alam M. S., Pathania S., Sharma A. Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings // *LWT*. 2016. Т. 74. С. 135-144.
- [2] Beck S. M. et al. Low moisture extrusion of pea protein and pea fibre fortified rice starch blends // *Journal of Food Engineering*. 2018. Т. 231. С. 61-71.
- [3] Jangchud K. et al. Optimization of pumpkin and feed moisture content to produce healthy pumpkin-germinated brown rice extruded snacks // *Agriculture and Natural Resources*. 2018. Т. 52. №. 6. С. 550-556.
- [4] Jozinović A. et al. Influence of spelt flour addition on properties of extruded products based on corn grits // *Journal of Food Engineering*. 2016. Т. 172. С. 31-37.
- [5] Korkerd S. et al. Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products // *Journal of food science and technology*. 2016. Т. 53. №. 1. С. 561-570.
- [6] Kristiawan M. et al. Multi-scale structural changes of starch and proteins during pea flour extrusion // *Food research international*. 2018. Т. 108. С. 203-215.
- [7] Li H. et al. A novel in-situ enhanced blasting extrusion technique Extrudate analysis and optimization of processing conditions with okara // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2012. Т. 16. С. 80-88.
- [8] Lu F., Liu Y., Li B. Okara dietary fiber and hypoglycemic effect of okara foods // *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 2013. Т. 2. №. 2. С. 126-132.
- [9] Maskan M., Altan A. *Advances in food extrusion technology*. CRC press, 2016.
- [10] Stojceska V. et al. The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology // *Journal of Cereal Science*. 2008. Т. 47. №. 3. С. 469-479.
- [11] YAĞCI S., GÖĞÜŞ F. Development of extruded snack from food by-products: a response surface analysis // *Journal of food process engineering*. 2009. Т. 32. №. 4. С. 565-586.
- [12] Zhu L. J. et al. Mechanical and microstructural properties of soy protein-high amylose corn starch extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion // *Journal of food engineering*. 2010. Т. 100. №. 2. С. 232-238.
- [13] Курочкин А.А., Фролов Д.И. Применение компьютерных средств разработки программ для автоматизации расчета индекса расширения экструдата овса // *Информационные технологии в экономических и технических задачах: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции*. Пенза, 2016. С. 300–302.
- [14] Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Фролов Д.И. Получение экструдатов крахмалсодержащего зернового

- сырья с заданной пористостью // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 6 (22). С. 109–114.
- [15] Научно-технологическое обоснование энергоэффективной технологии экструдирования сельскохозяйственного сырья / А.А. Курочкин, П.К. Воронина, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы (24–25 мая 2016 г.): Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф. Х. Бурумкулова. Саранск, 2016. С. 338–344.
- [16] Оптимизация состава зернопродуктов при получении пивного суслу 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.
- [17] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д.И. Фролов [и др.] // Нива Поволжья. 2019. № 2 (51). С. 134–143.
- [18] 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.
- [19] Способ производства хлебобулочных изделий : пат. 2579488 Российская Федерация : МПК А 21 D 8/02 / Г.В. Шабурова, П.К. Воронина, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов, Н.Н. Шматкова ; 2014146596/13 ; заявл. 19.11.2014 ; опубл. 10.4.2016, Бюл. №10. 8 с.
- [20] Способ производства хлебобулочных изделий : пат. 2592619 Российская Федерация : МПК А 21 D 8/02 / Г.В. Шабурова, П.К. Воронина, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов, Н.Н. Шматкова ; 2015109402/13 ; заявл. 17.3.2015 ; опубл. 27.7.2016, Бюл. №21. 8 с.
- [21] Теоретическое обоснование термовакуумного 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.
- [22] Фролов Д.И., Курочкин А.А. Информатизация процесса экструдирования овса с помощью программы расчета индекса расширения экструдата // Пищевые инновации и биотехнологии: Материалы IV Международной научной конференции / под общ. ред. М.П. Кирсанова; ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)». Кемерово, 2016. С. 253–255.
- [23] 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.
- [24] Экструдер с вакуумной камерой : пат. 192684 Российская Федерация : МПК В29С 48/00 / А.А. Курочкин, П.К. Гарькина, Д.И. Фролов, А.А. Блинохватов, М.А. Потапов ; 2019118768 ; заявл. 17.6.2019 ; опубл. 26.9.2019, Бюл. №27. 7 с.

References

- [1] Alam M. S., Pathania S., Sharma A. Optimization of the extrusion process for development of high fiber soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings // LWT. 2016.V. 74.P. 135-144.
- [2] Beck S. M. et al. Low moisture extrusion of pea protein and pea fiber fortified rice starch blends // Journal of Food Engineering. 2018.Vol. 231.P. 61-71.
- [3] Jangchud K. et al. Optimization of pumpkin and feed moisture content to produce healthy pumpkin-germinated brown rice extruded snacks // Agriculture and Natural Resources. 2018.V. 52. No. 6.P. 550-556.
- [4] Jozinović A. et al. Influence of spelt flour addition on properties of extruded products based on corn grits // Journal of Food Engineering. 2016.Vol. 172.P. 31-37.
- [5] Korkerd S. et al. Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products // Journal of food science and technology. 2016.V. 53. No. 1, p. 561-570.
- [6] Kristiawan M. et al. Multi-scale structural changes of starch and proteins during pea flour extrusion // Food research international. 2018.V. 108.P. 203-215.
- [7] Li H. et al. A novel in-situ enhanced blasting extrusion technique Extrudate analysis and optimization of processing conditions with okara // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2012.V. 16.P. 80-88.
- [8] Lu F., Liu Y., Li B. Okara dietary fiber and hypoglycemic effect of okara foods // Bioactive Carbohydrates and Dietary Fiber. 2013.V. 2.No. 2, p. 126-132.
- [9] Maskan M., Altan A. Advances in food extrusion technology. CRC press, 2016.
- [10] Stojceska V. et al. The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology // Journal of Cereal Science. 2008.V. 47. No. 3, pp. 469-479.
- [11] YAĞCI S., GÖĞÜŞ F. Development of extruded snack from food by □ products: a response surface analysis // Journal of food process engineering. 2009.V. 32. No. 4.P. 565-586.
- [12] Zhu L. J. et al. Mechanical and microstructural properties of soy protein – high amylose corn starch

- extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion // Journal of food engineering. 2010.V. 100. No. 2, pp. 232-238.
- [13] Kurochkin A.A., Frolov D.I. The use of computer-aided software development tools for automating the calculation of the oat extrudate expansion index // Information Technologies in Economic and Technical Problems: Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference. Penza, 2016. PP. 300-302.
- [14] Kurochkin A.A., Shaburova G.V., Frolov D.I. Obtaining extrudates of starch-containing grain raw materials with a given porosity // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2014. No. 6 (22). PP. 109–114.
- [15] Scientific and technological substantiation of energy-efficient technology for the extrusion of agricultural raw materials / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // Energy-efficient and resource-saving technologies and systems (May 24–25, 2016): Collection of scientific papers of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor F. Kh. Burumkulov. Saransk, 2016.PP. 338–344.
- [16] Optimization of the composition of grain products in the production of beer wort using extruded barley / G.V. Shaburova, A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, D.I. Frolov // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2014. No. 6 (22). PP. 103–109.
- [17] Improving the efficiency of dehydration of the extrudate in the vacuum chamber of a modernized extruder / DI Frolov [et al.] // Niva Volga. 2019.No 2 (51). PP. 134–143.
- [18] 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. 2017. No. 4 (45). PP. 157–163.
- [19] Method for the production of bakery products: US Pat. 2579488 Russian Federation: IPC A 21 D 8/02 / G.V. Shaburova, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov, N.N. Shmatkov; 2014146596/13; declared 11/19/2014; publ. 04/10/2016, Bull. No. 10. 8 sec
- [20] Method for the production of bakery products: US Pat. 2592619 Russian Federation: IPC A 21 D 8/02 / G.V. Shaburova, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov, N.N. Shmatkov; 2015109402/13; declared 3/3/2015; publ. 7/27/2016, Bull. No. 21. 8 sec
- [21] Theoretical substantiation of thermal vacuum effect in the working process of a modernized extruder / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. 2015. No 3. P. 15–20.
- [22] Frolov D.I., Kurochkin A.A. Informatization of the process of extrusion of oats using a program for calculating the extrudate expansion index // Food Innovation and Biotechnology: Materials of the IV International Scientific Conference / ed. ed. M.P. Kirsanova; FSBEI of HE «Kemerovo Technological Institute of Food Industry (University).» Kemerovo, 2016.PP. 253–255.
- [23] Extrudates from plant materials with a high content of lipids and dietary fiber / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // Technique and technology of food production. 2016. No. 3 (42). PP. 104–111.
- [24] Extruder with a vacuum chamber: US Pat. 192684 Russian Federation: IPC B29C 48/00 / A.A. Kurochkin, P.K. Garkina, D.I. Frolov, A.A. Blinohvatov, M.A. Potapov; 2019118768; declared 6/17/2019; publ. September 26, 2019, Bull. Number 27. 7 p.

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>Чистякова Евгения Андреевна магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: E-mail:</p>	<p>Chistyakova Evgenia Andreevna undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: E-mail:</p>