

УДК 664.769

Изменение физико-химических свойств экструдата из риса при вакуумной экструзии

Фролов Д.И., Симаков Д.Г.

Аннотация. В статье проведено изучение влияния переменных на экструзию рисовой муки при помощи вакуумного экструдера и сравнение с обычной атмосферной экструзией. Анализ переменных был проведен с помощью методологии поверхности отклика. Программа Statistica 10 была использована для составления плана эксперимента, проведения статистического анализа и использовалась для разработки, оценки эффектов и получения поверхностей отклика. Экструзионные смеси были приготовлены из рисовой муки (50%) и муки коричневого риса (50%), а содержание влаги варьировалось от 25% до 35%. В качестве независимых переменных процесса экструзии выступали: температура, влажность сырья, скорость вращения шнека и величина вакуума. Зависимыми переменными отклика были: насыпная плотность, индекс водопоглощения и удельная механическая энергия. Все независимые параметры оказывали значительное влияние на насыпную плотность. Повышение уровня вакуума увеличивает индекс водопоглощения за счет образования пористой структуры. Содержание влаги в смеси оказывает значительное влияние на удельную механическую энергию. можно сделать вывод, что вакуумная экструзия является эффективным способом получения расширенных экструдатов с измененными физико-химическими свойствами.

Ключевые слова: экструзия, вакуум, рис, мука, насыпная плотность, индекс водопоглощения, удельная механическая энергия.

Для цитирования: Фролов Д.И., Симаков Д.Г. Изменение физико-химических свойств экструдата из риса при вакуумной экструзии // Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9. № 2. С. 24–30. EDN: SFBFQN.

Changes in the physicochemical properties of rice extrudate during vacuum extrusion

Frolov D.I., Simakov D.G.

Abstract. The article studies the influence of variables on the extrusion of rice flour using a vacuum extruder and compares it with conventional atmospheric extrusion. Variable analysis was carried out using the response surface methodology. The Statistica 10 program was used to design the experiment, perform the statistical analysis, and was used to design, evaluate effects, and obtain response surfaces. Extrusion mixtures were made from rice flour (50%) and brown rice flour (50%), and the moisture content varied from 25% to 35%. The independent variables of the extrusion process were: temperature, raw material moisture content, screw rotation speed and vacuum value. The dependent response variables were: bulk density, water absorption index and specific mechanical energy. All independent parameters had a significant effect on the bulk density. Increasing the vacuum level increases the water absorption index due to the formation of a porous structure. The moisture content of the mixture has a significant effect on the specific mechanical energy. it can be concluded that vacuum extrusion is an effective way to obtain expanded extrudates with modified physicochemical properties.

Keywords: extrusion, vacuum, rice, flour, bulk density, water absorption index, specific mechanical energy.

For citation: Frolov D.I., Simakov D.G. Changes in the physicochemical properties of rice extrudate during vacuum extrusion. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2022. Vol. 9. No. 2. pp. 24–30. EDN: SFBFQN. (In Russ.).

Введение

Экструзия представляет собой высокотемпературный кратковременный процесс, часто используемый для производства сухих завтраков, готовых к употреблению закусок с расширенной структурой и хрустящей текстурой [2].

Рис является привлекательным сырьем для производства безглютеновых продуктов питания методом экструзии. Для экструдированного продукта обычно используется полированный рис или белый рис, хотя существует несколько сортов риса, содержащих цветные пигменты, такие как черный, фиолетовый и красный рис. Красный рис является отличным источником фенольных соединений. Он содержит значительное количество антоцианов, фенольных кислот, флавоноидов и витаминов. Однако все эти соединения термолабильны и разрушаются

при термической обработке. Большинство фенольных соединений разрушается во время экструзии. В ряде исследований сообщалось, что использование сверхкритической жидкости во время экструзии снижает потери различных биоактивных соединений [5]. Однако нет подробных отчетов о влиянии вакуумной экструзии на физико-химические свойства расширенных экструдированных продуктов на основе рисовой муки [3].

Методология поверхности отклика считается эффективным инструментом для разработки взаимосвязи между независимыми переменными и целевыми параметрами. В методологии поверхности отклика влияние и взаимодействие переменных оценивается с помощью статистических методов для разработки эмпирической математической модели. Из-за сложности и изменчивости экструзия

Таблица 1 - План эксперимента с независимыми и зависимыми переменными

№	Температура (Т), °С	Влажность сырья (W), %	Скорость вращения шнека (n), об/мин	Вакуум (p), кПа	Насыпная плотность (B), кг/м ³	WAI, г/г	УМЭ, кДж/кг
1	70	30	300	27	623	4,44	130
2	77,5	27,5	350	13	689	5,07	147
3	77,5	32,5	350	40	581	5,99	123
4	85	30	400	27	684	3,96	145
5	77,5	27,5	250	13	731	3,87	134
6	85	30	300	27	630	4,07	140
7	85	30	300	27	661	4,77	142
8	100	30	300	27	437	4,43	119
9	92,5	32,5	250	40	486	4,98	104
10	77,5	32,5	350	13	586	4,12	112
11	85	30	300	27	654	4,51	144
12	92,5	27,5	250	40	508	4,96	114
13	85	25	300	27	625	5,19	144
14	92,5	27,5	250	13	578	4,04	115
15	92,5	32,5	350	40	534	4,69	159
16	92,5	27,5	350	40	476	4,76	150
17	85	30	300	27	641	4,02	145
18	85	30	300	27	635	4,97	147
19	92,5	32,5	250	13	532	4,92	120
20	77,5	32,5	250	13	639	4,44	107
21	85	30	300	0	615	4,68	147
22	85	30	300	53	429	4,81	148
23	77,5	27,5	250	40	599	4,92	151
24	85	30	200	27	614	4	100
25	77,5	27,5	350	40	533	8,09	157
26	85	30	300	27	624	4,99	150
27	92,5	27,5	350	13	589	5,02	165
28	92,5	32,5	350	13	573	3,63	158
29	77,5	32,5	250	40	600	4,28	100
30	85	35	300	27	611	4,93	113

Таблица 2 – Качественные показатели модели

Зависимая переменная	Множест. - R	Множест. - R2	F	p
Насыпная плотность (B), кг/м ³	0,97	0,95	20,25	0
WAI, г/г	0,84	0,7	2,5	0,04
УМЭ, кДж/кг	0,97	0,95	19,66	0

пищевых продуктов рассматривается как сложный нелинейный процесс.

Целью настоящего исследования было изучение влияния переменных на экструзию рисовой муки при помощи вакуумного экструдера и сравнение с обычной атмосферной экструзией. Анализ переменных был проведен с помощью методологии поверхности отклика. Исследование было посвящено влиянию вакуумной экструзии на физико-химические свойства расширенных экструдатов на основе рисовой муки.

Объекты и методы исследования

Экструзионные смеси были приготовлены из рисовой муки (50%) и муки коричневого риса (50%), а содержание влаги варьировалось от 25% до 35%. В данном исследовании коричневый рис

выступал в качестве наполнителя и для сохранения цвета. Все эксперименты по экструзии проводили с использованием одношнекового лабораторного экструдера ЭК-40 (диаметр шнека 40 мм) с использованием фильеры диаметром 3 мм. Скорость вращения шнека (200-400 об/мин), температура ствола экструдера (70-100°C) и вакуум (0-53 кПа) во время экструзии варьировались, как показано в таблице 1. Экструдат был высушен при 60°C в течение 2 часов для достижения содержания влаги 10%.

Насыпная плотность образца определялась в трех экземплярах. Кусочки экструдата длиной 5 см заполняли в мерный цилиндр объемом 500 мл путем постукивания. Затем насыпную плотность образца определяли как массу экструдатов, деленную на объем, и выражали в кг/м³.

Индекс водопоглощения (WAI) измеряет объем, занимаемый гранулами или крахмальным полимером после набухания в избытке воды. Индекс растворимости в воде (WSI) определяет количество свободного полисахарида или полисахарида, высвобождающегося из гранулы при добавлении избытка воды. Измельченный экструдат суспендировали в воде при комнатной температуре ($28 \pm 2^\circ\text{C}$) в течение 30 минут и осторожно перемешивали, затем центрифугировали при 3000 оборотах в течение 15 минут. Индекс водопоглощения (WAI) представлял

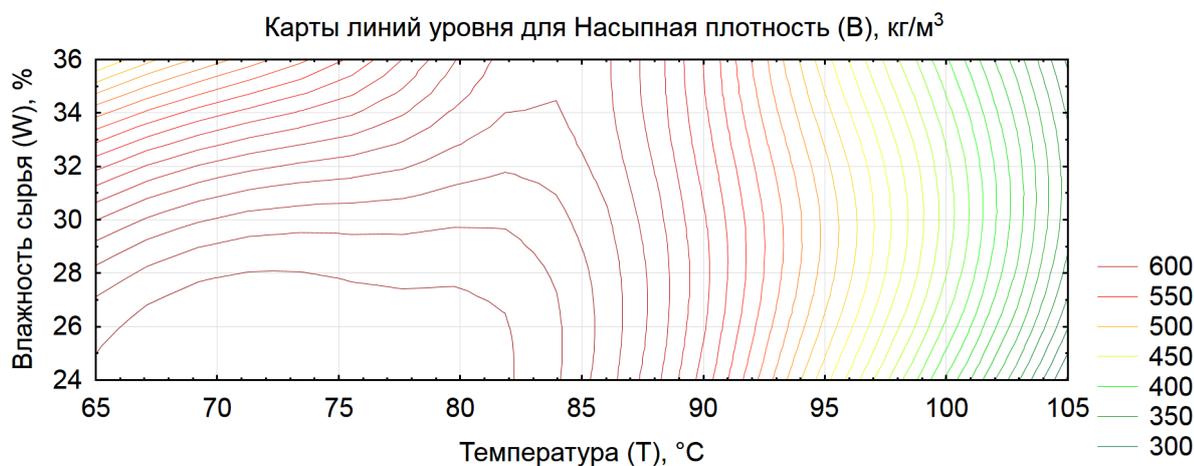


Рис.1. Карта линий уровня зависимости насыпной плотности от влажности сырья и температуры

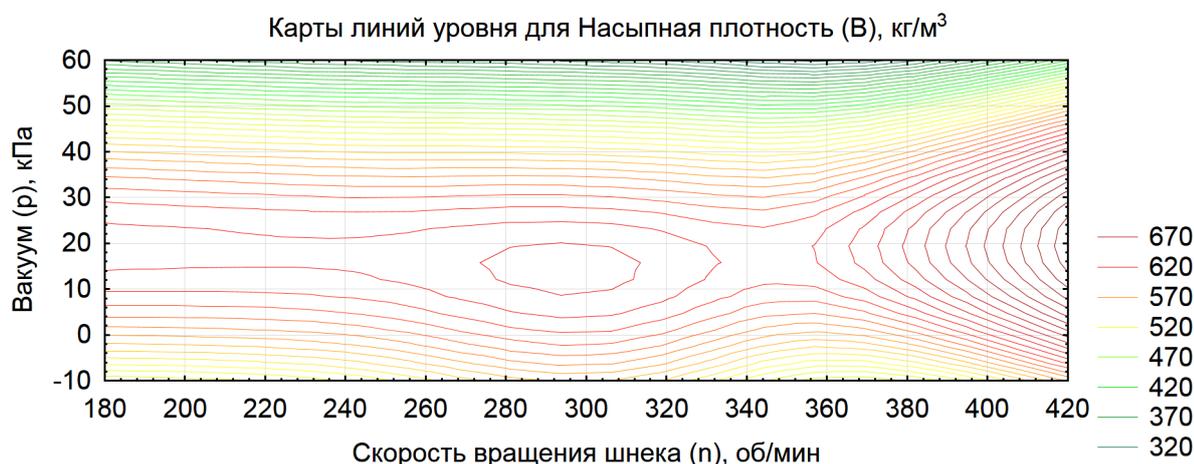


Рис.2. Карта линий уровня зависимости насыпной плотности от величины вакуума и скорости вращения шнека

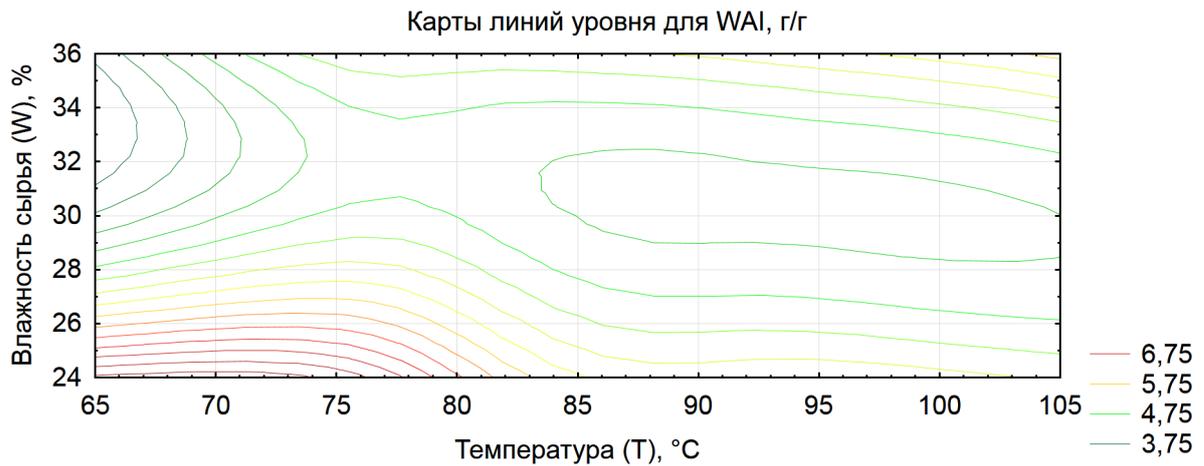


Рис.3. Карта линий уровня зависимости индекса водопоглощения (WAI) от влажности сырья и температуры

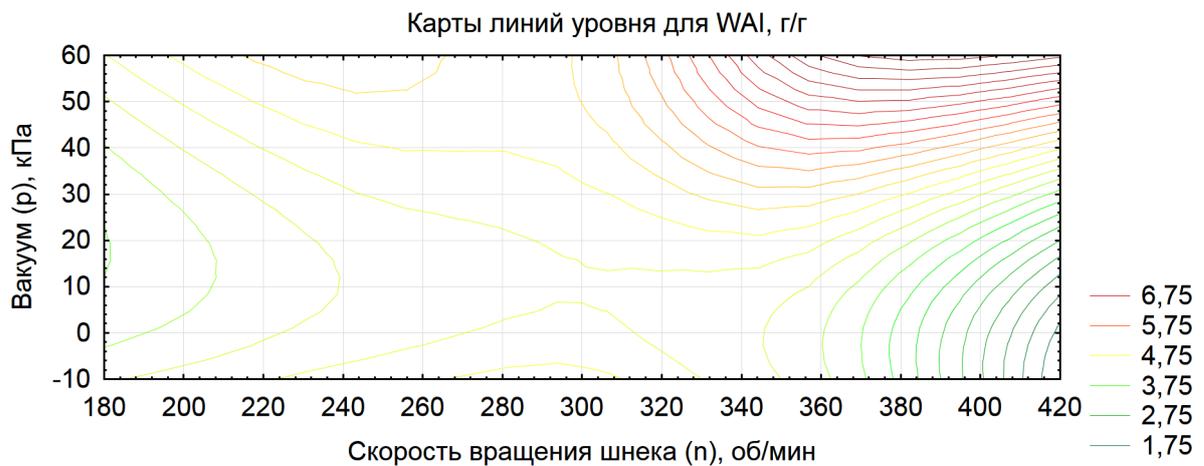


Рис.4. Карта линий уровня зависимости индекса водопоглощения (WAI) от величины вакуума и скорости вращения шнека

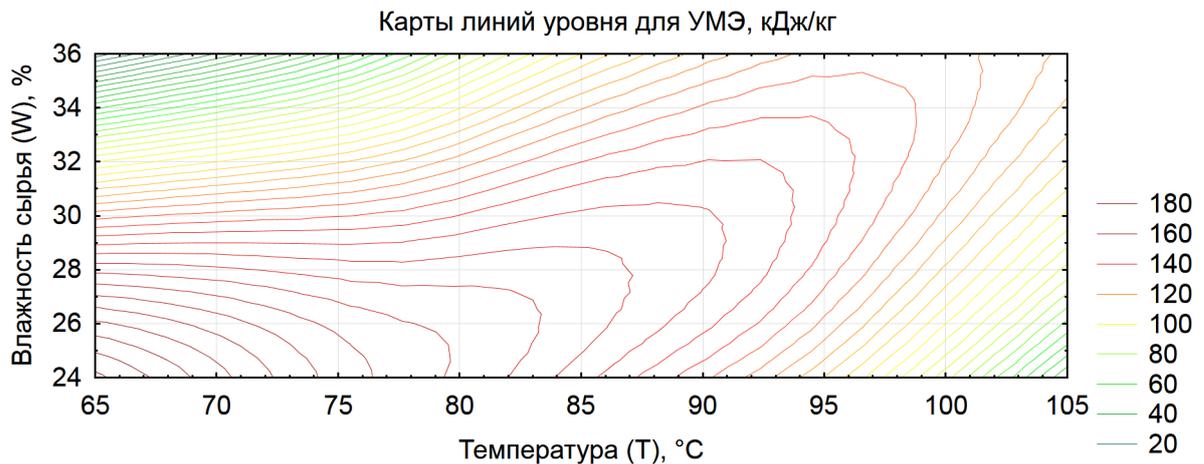


Рис.5. Карта линий уровня зависимости УМЭ от влажности сырья и температуры

собой массу геля, полученного после удаления надосадочной жидкости, на единицу массы исходного сухого вещества. Индекс растворимости в воде (WSI) - масса сухого вещества в супернатанте, выраженная в процентах от исходной массы образца.

Удельная механическая энергия (УМЭ) может быть определена как энергия, передаваемая моторным приводом материалу в экструдере на единицу массы.

Центральное композиционное планирование эксперимента использовалось для оценки влияния переменных процесса экструзии на удельную механическую энергию и физические свойства экструдатов. Программа Statistica 10 была использована для составления плана эксперимента, проведения статистического анализа и использовалась для разработки, оценки эффектов и получения поверхностей отклика.

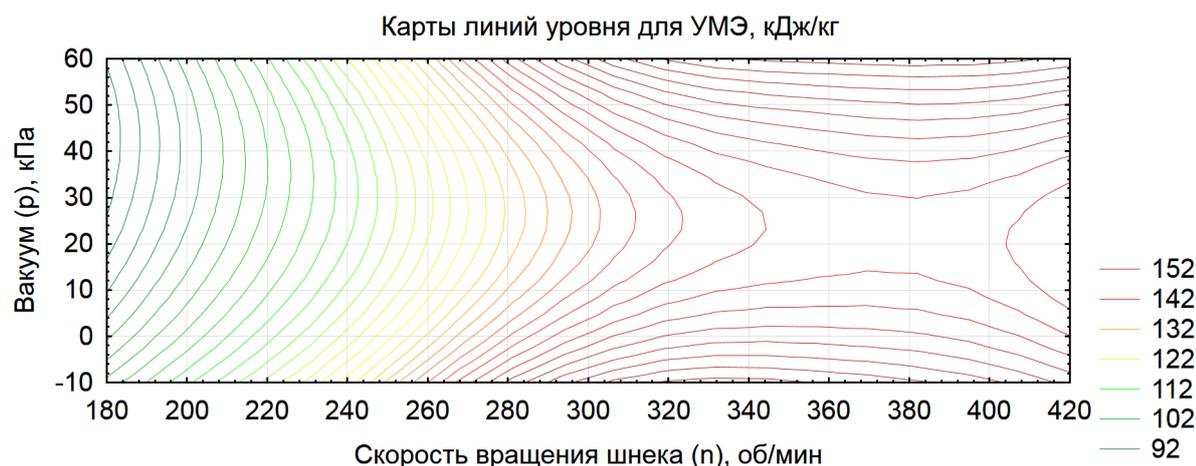


Рис. 6. Карта линий уровня зависимости УМЭ от величины вакуума и скорости вращения шнека

Результаты и их обсуждение

На рисунках 1 и 2 показано влияние параметров экструзии на насыпную плотность экструдатов. Насыпная плотность экструдатов варьировалась от 409 до 764 кг/м³. Все независимые параметры оказывали значительное влияние на насыпную плотность (Таблица 2) с высоким коэффициентом детерминации (0,97). Насыпная плотность экструдата уменьшалась с увеличением температуры в стволе экструдера. Во время экструзии повышение температуры процесса увеличивает количество перегретого пара, который усиливает образование пузырьков и снижает вязкость расплава, что приводит к получению продукта с низкой насыпной плотностью экструдатов. Увеличение уровня вакуума, по-видимому, снижает насыпную плотность экструдатов [4]. При применении вакуума, влага, присутствующая в сырье, испаряется при низкой температуре, поэтому объем экструдатов увеличивается, что приводит к снижению насыпной плотности. Возможно, что увеличение уровня вакуума также увеличивает количество воздушных пузырьков, присутствующих в экструдате, что приводит к уменьшению насыпной плотности. Насыпная плотность образца увеличивается с увеличением содержания влаги. Другие исследователи сообщали, что молекулярная структура амилопектина изменяется из-за изменения содержания влаги во время экструзии, поэтому эластичность расплава уменьшается, его выход снижает желатинизацию и тем самым уменьшает расширение и увеличивает плотность экструдата [1]. Скорость вращения шнека также влияет на насыпную плотность экструдатов. Увеличение скорости вращения шнека незначительно увеличивает насыпную плотность. Это связано с тем, что увеличение скорости вращения шнека в процессе переработки уменьшает время пребывания сырья в экструдере и, таким образом, снижает степень желатинизации крахмала, что уменьшает воздухоудерживающую способность, приводя к увеличению насыпной плотности.

На рисунках 3 и 4 показано влияние перемен-

ных параметров экструзии на индекс водопоглощения (WAI) экструдатов. Значения WAI экструдатов изменяются от 3,87 до 6,09 г/г, в то время как контрольный образец (без экструзии) имеет 3,32 г/г. При увеличении содержания влаги до 30% увеличивается WAI, однако после 30% наблюдается обратная тенденция. Индекс водопоглощения измеряет степень поглощения воды крахмалом после набухания в избытке воды и сохраняет целостность образца в водной дисперсии. Увеличение содержания влаги в сырье приводит к снижению WAI, что обусловлено смазкой шнеков. Следовательно, происходит уменьшение сдвига и трения, что приводит к снижению влаги и, наконец, к получению нерасширенной структуры. Температура процесса также вызывает снижение WAI из-за увеличения деградации и декстринизации крахмала. Индекс водопоглощения также снижается с увеличением температуры ствола, если декстринизация или плавление крахмала преобладает над желатинизацией. Уровень вакуума также оказывает значительное влияние на индекс водопоглощения экструдатов. Повышение уровня вакуума увеличивает возможную WAI за счет образования пористой структуры, что приводит к увеличению поглощения воды. Однако скорость вращения шнека оказывает отрицательное влияние на WAI, что согласуется с данными других исследователей [6]. Это может быть связано с деградацией крахмала, которая вызывает снижение водоудерживающей способности молекул в результате уменьшения размера молекул.

На рисунках 5 и 6 показано влияние переменных параметров экструзии на удельную механическую энергию. Удельная механическая энергия (УМЭ) - это количество энергии, поступающей в экструзионную систему за счет вязкой диссипации, она варьируется от 100 до 165 кДж/кг (Таблица 1). Содержание влаги в смеси оказывает значительное влияние на УМЭ (Таблица 2). Увеличение содержания влаги в смеси значительно снижает УМЭ процесса экструзии. Высокое содержание влаги в смеси подразумевает смазывающий эффект, в результате чего снижается потребность в энергии и,

соответственно, уменьшается УМЭ. Повышение температуры экструзии снижает УМЭ. Высоко-температурная экструзия способствует преобразованию твердого потока в вязкоупругий поток, в основном за счет желатинизации крахмала. Таким образом, она снижает вязкость расплава, что в свою очередь уменьшает УМЭ. Увеличение скорости вращения шнека приводит к значительному увеличению УМЭ процесса экструзии, так как УМЭ прямо пропорциональна скорости шнека. Однако применяемый вакуум не оказывает значительного влияния на УМЭ.

Литература

- [1] Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of Extruded Brown Rice / H.S. Gujral, P. Sharma, A. Kumar, B. Singh // *International Journal of Food Properties*. 2012. Т. 15. № 2. С. 301–311.
- [2] 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.
- [3] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д.И. Фролов [и др.] // *Нива Поволжья*. 2019. № 2 (51). С. 134–143.
- [4] 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.
- [5] Mustapha N.A., Ruttarattanamongkol K., Rizvi S.S.H. The effects of supercritical fluid extrusion process on surface hydrophobicity of whey protein concentrate and its relation to storage and heat stability of concentrated emulsions // *Food Research International*. 2012. Vol. 48. № 2. P. 470–477.
- [6] O'Shea N., Gallagher E. Evaluation of novel-extruding ingredients to improve the physicochemical and expansion characteristics of a corn-puffed snack-containing pearled barley // *European Food Research and Technology*. 2019. Vol. 245. № 6. P. 1293–1305.

Выводы

Экструзия с использованием вакуума оказывает заметное влияние на насыпную плотность и индекс водопоглощения экструдатов по сравнению с обычной экструзией при атмосферном давлении. Увеличение скорости вращения шнека приводит к значительному увеличению удельной механической энергии процесса экструзии. Таким образом, можно сделать вывод, что вакуумная экструзия является эффективным способом получения расширенных экструдатов с измененными физико-химическими свойствами.

References

- [1] Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of Extruded Brown Rice / H.S. Gujral, P. Sharma, A. Kumar, B. Singh // *International Journal of Food Properties*. 2012. V. 15. No. 2. S. 301–311.
- [2] Prospects for the use of extruded buckwheat in brewing and baking / G.V. Shaburova, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // *Proceedings of the Samara State Agricultural Academy*. 2014. No. 4. S. 79–83.
- [3] Improving the efficiency of extrudate dehydration in the vacuum chamber of a modernized extruder / D.I. Frolov [and others] // *Niva of the Volga region*. 2019. No. 2 (51). pp. 134–143.
- [4] Extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids and food fibers / 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.
- [5] Mustapha N.A., Ruttarattanamongkol K., Rizvi S.S.H. The effects of supercritical fluid extrusion process on surface hydrophobicity of whey protein concentrate and its relation to storage and heat stability of concentrated emulsions // *Food Research International*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 470–477.
- [6] O'Shea N., Gallagher E. Evaluation of novel-extruding ingredients to improve the physicochemical and expansion characteristics of a corn-puffed snack-containing pearled barley // *European Food Research and Technology*. 2019 Vol. 245. No. 6. P. 1293–1305.

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>Симаков Данил Геннадьевич магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p>	<p>Simakov Danil Gennadievich undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University</p>