Научная статья
УДК 664.769
doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-37-46

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОВАКУУМНОЙ ЭКСТРУЗИИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ПРОДУКТА

Дмитрий Иванович Фролов[1], **Анатолий Алексеевич Курочкин**[2]✉, **Максим Александрович Потапов**[3]
[1, 2, 3] Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
[1]surr@bk.ru, http://orcid.org/0000-0002-9166-1132
[2]anatolii_kuro@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-3824-4364
[3]makcpotapov@mail.ru, http://orcid.org/0009-0002-8632-8447

Резюме. *В статье рассмотрено влияние вакуумной экструзионной обработки на физические и физико-химические свойства экструдированной кормовой смеси. Было изучено влияние переменных факторов экструзионного процесса на кормовую смесь, полученную посредством обработки смеси ржи и пажитника с помощью термовакуумной и обычной экструзии. В качестве исследуемых факторов были выбраны температура цилиндра, частота вращения шнека, влажность сырья и уровень вакуума в камере на выходе из матрицы экструдера. Анализ их влияния на процесс термовакуумной экструзии был выполнен с помощью методологии поверхности отклика. Для эксперимента использовали модернизированный экструдер ЭК-40, оснащенный рабочим шнеком диаметром 40 мм, с отношением длины шнека к его диаметру 4:1 и температурным режимом 70-100 °С. Смеси для экструзии готовили из ржи (2 части) и пажитника (1 часть), а содержание влаги в них изменялась в пределах интервала от 25 до 35%. Частота вращения шнека варьировала от 200 до 350 об/мин, вакуум в вакуумной камере в диапазоне 0-400 мм рт. ст. С помощью дисперсионного анализа и методологии поверхности отклика был проведен анализ влияния температуры цилиндра, частоты вращения шнека, влажности сырья и уровня вакуума на индекс водопоглощения, насыпную плотность, удельную механическую энергию, общее содержание фенолов и коэффициент расширения экструдатов. В ходе исследования были получены следующие оптимальные параметры экструзии: температура цилиндра 77,5 °С, влажность смеси 32,5 %, частота вращения шнека 350 об/мин и уровень вакуума 300 мм рт. ст. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что термовакуумная экструзия оказывает более заметное влияние на коэффициент расширения, насыпную плотность и индекс водопоглощения экструдатов по сравнению с обычной экструзией. Полученный экструдат содержал значимое для организма животных количество антоцианов C3G, P3G и других полезных веществ, обычно разрушающихся под действием высоких температур. Объясняется это тем, что пониженное давление в вакуумной камере способствует расширению экструдированной смеси при более низких температурах, чем при «классической» горячей экструзии, что способствует сохранению биоактивных соединений обрабатываемого сырья.*

Ключевые слова: экструзия, вакуум, пажитник, антоцианы, рожь, коэффициент расширения.

Для цитирования*:* Фролов Д. И., Курочкин А. А., Потапов М. А. Влияние термовакуумной экструзии на физические и физико-химические свойства получаемого продукта // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. Т. 9, № 4. С. 37-46. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-37-46

Original article

INFLUENCE OF THERMAL VACUUM EXTRUSION ON THE PHYSICAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF THE RESULTING PRODUCT

Dmitry I. Frolov[1], **Anatoly A. Kurochkin**[2]✉, **Maxim A. Potapov**[3]
[1, 2, 3] Penza State Technological University, Penza, Russia
[1]surr@bk.ru, http://orcid.org/0000-0002-9166-1132
[2]anatolii_kuro@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-3824-4364
[3]makcpotapov@mail.ru, http://orcid.org/0009-0002-8632-8447

Abstracts. The article considers the effect of vacuum extrusion processing on the physical and physicochemical properties of the extruded feed mixture. The influence of the variable factors of the extrusion process on the feed mixture obtained by processing the mixture of rye and fenugreek using thermal vacuum and conventional extrusion was studied. The barrel temperature, screw rotation speed, raw material moisture content and the vacuum level in the chamber at the outlet of the extruder matrix were selected as the studied factors. The analysis of their influence on the thermal vacuum extrusion process was performed using the response surface methodology. For the experiment, a modernized EK-40 extruder equipped with a working screw with a diameter of 40 mm, with a screw length to diameter ratio of 4:1 and a temperature regime of 70-100 °C was used. The mixtures for extrusion were prepared from rye (2 parts) and fenugreek (1 part), and the moisture content in them varied within the range from 25 to 35%. The screw speed was varied from 200 to 350 rpm, and the vacuum in the vacuum chamber was in the range of 0-400 mmHg. Using the analysis of variance and response surface methodology, the influence of barrel temperature, screw speed, feedstock moisture content, and vacuum level on

© Фролов Д. И., Курочкин А. А., Потапов М. А., 2024

the water absorption index, bulk density, specific mechanical energy, total phenol content, and expansion coefficient of the extrudates was analyzed. The following optimal extrusion parameters were obtained during the study: barrel temperature of 77,5 °C, mixture moisture of 32,5%, screw speed of 350 rpm, and vacuum level of 300 mmHg. The results of the study allow us to conclude that thermal vacuum extrusion has a more noticeable effect on the expansion coefficient, bulk density, and water absorption index of the extrudates compared to conventional extrusion. The resulting extrudate contained a significant amount of anthocyanins C3G, P3G and other useful substances for the animal organism, which are usually destroyed by high temperatures. This is explained by the fact that the reduced pressure in the vacuum chamber promotes the expansion of the extruded mixture at lower temperatures than with "classic" hot extrusion, which helps preserve the bioactive compounds of the processed raw materials.

Keywords: extrusion, vacuum, fenugreek, anthocyanins, rye, expansion coefficient.

For citation: Frolov, D. I., Kurochkin, A. A. & Potapov, M. A. (2024). Influence of thermal vacuum extrusion on the physical and physicochemical properties of the obtained product. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy*), 9, 4, 37-46. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-4-37-46 (in Russ).

Экструзия растительного сырья представляет собой кратковременный высокотемпературный процесс, включающий в себя процессы разминания, нагревания материала при высоком давлении и продавливания его через узкое отверстие с целью механической и тепловой обработки [1, 2, 3]. Экструзия – это сложный процесс, в котором небольшие изменения в условиях обработки влияют на переменные процесса экструзии, а также на качество производимых кормов [8, 11]. Качество корма с точки зрения структуры и питательных свойств значительно различается в зависимости от типа экструдера, конфигурации шнека, температуры цилиндра, содержания жира и влаги в смеси [9, 14]. Преимущества экструзии заключаются в измельчении корма для лучшего пищеварения, денатурации белков под воздействием высокой температуры и давления, что повышает его энергетическую ценность, а также в снижении содержания антинутриентов и токсинов [12, 19]. Экструзия эффективно стерилизует корм, уничтожая бактерии и плесень, продлевая срок хранения [5, 13]. Процесс также способствует желированию крахмала, улучшая усвояемость углеводов, и позволяет гомогенизировать компоненты корма, придавая ему нужную форму, особенно при достаточном содержании крахмала [10]. Структурные свойства экструдатов имеют большое значение при производстве качественных кормов. Сохранение функционального качества экструдированных кормов затруднено из-за высокотемпературной обработки, которая стимулирует нежелательные эффекты, вызывающие потери термолабильных биоактивных соединений, окисление липидов, разрушение или снижение доступности аминокислот и других термочувствительных питательных веществ. Поэтому сохранение биоактивных соединений в экструдированных кормах остается проблемой для практической технологии переработки растительного сырья с помощью экструзионных методов [4].

Добавление бобовых в злаковые культуры, является перспективным направлением в совершенствовании экструзионных процессов и улучшения состава кормов [6, 7]. Например, пажитник содержит уникальные биоактивные соединения: диосгенин – стероидный сапонин с противовоспалительными свойствами; тригонеллин – алкалоид с антидиабетическим эффектом; 4-гидроксиизолейцин – аминокислота, улучшающая чувствительность к инсулину; галактоманнан - растворимое пищевое волокно, снижающее уровень холестерина. Пажитник богат витаминами (A, E, C, PP), минералами (фосфор, железо, магний), эфирными маслами и антиоксидантами [16]. В животноводстве пажитник ценится за его способность улучшать пищеварение, благодаря наличию клетчатки и энзимов, а также повышать иммунитет. Он также способствует укреплению здоровья животных, снижает уровень плохого холестерина и улучшает общее состояние организма. Одно из важных преимуществ пажитника в кормах заключается в том, что он может улучшать аппетит и стимулировать пищеварение у сельскохозяйственных животных, что особенно важно для повышения продуктивности в молочном и мясном животноводстве. Кроме того, пажитник помогает снижать уровень токсинов в организме и обладает противовоспалительными свойствами.

Также кормовая смесь на основе ржи и пажитника содержит значительное количество антоцианов, фенольных кислот, флавонов и витаминов. При этом практически все эти соединения являются термолабильными и разрушаются во время термической обработки. Экструзия считается кратковременным высокотемпературным процессом, при котором большинство фенольных соединений разрушаются. Поэтому для обработки кормовых ингредиентов с высоким содержанием биоактивных соединений, может быть использована гибридная система экструзии, основанная на несколько иных физических принципах, чем ее классический аналог. В нескольких исследованиях представлена информация, о том, что использование сверхкритической жидкости во время экструзии снижает потери различных биоактивных соединений [15, 17, 18, 20]. Однако нет подробных отчетов о влиянии термовакуумной экструзии на физико-химические и фитохимические свойства расширенных экструдированных продуктов на основе ржи и пажитника.

Влияние процесса термовакуумной экструзии на характеристики корма зависит от нескольких переменных экструзии, таких как частота вращения шнека, влажность сырья, температура цилиндра и уровень вакуума.

Конфигурация экструдера также влияет на качество получаемой кормовой смеси. Поэтому для получения оптимальных условий процесса для получения высококачественного корма предпосылкой является выяснение связей и важности переменных в процессе экструзии.

Цель исследования: повышение качества экструдата смеси ржи и пажитника с помощью термовакуумной экструзии и их сравнение с обычной экструзией.

Задачи исследований: анализ переменных факторов процесса термовакуумной экструзии с помощью методологии поверхности отклика. Исследование влияния термовакуумной экструзии на физические и физико-химические свойства экструдированных продуктов на основе ржи и пажитника.

Материал и методы исследований. Смеси для экструзии готовили из ржи (2 части) и пажитника (1 часть), а содержание влаги варьировалось от 25% до 35%. Частота вращения шнека (200–350 об/мин), температура цилиндра (70-100 °C) и вакуум в вакуумной камере (0-400 мм рт. ст.) во время экструзии варьировались, как показано в таблице 1. Использовался одношнековый экструдер с вакуумной камерой, разработанный на кафедре «Пищевые производства» ПензГТУ (рисунок 1). Экструдер имеет симметричную конфигурацию в секции смешивания, сжатия и дозирования, с соотношением длины к диаметру шнека (L/D) 4:1, диаметром шнека 40 мм, шагом шнека 2 мм и отверстием матрицы 6×3 мм. Экструдат сушили при 60 °C в течение 2 часов для достижения содержания влаги 10%.

Рис. 1. Общий вид термовакуумного экструдера

Таблица 1

Матрица эксперимента: независимые и зависимые факторы

№	Температура ствола (°C)	Частота вращения шнека (об/мин)	Содержание влаги (%)	Вакуум (мм рт. ст., изб.)	Индекс водопоглощения	Насыпная плотность (кг/м^3)	Удельная механическая энергия (кДж/кг)	Общее содержание фенолов (мг GAL/100 г)	Коэффициент расширения
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
1	70	300	30	200	4,45	624	131	35,7	1,17
2	92,5	350	32,5	300	4,68	533	160	20,1	1,18
3	92,5	250	27,5	300	4,97	507	115	29,3	1,51
4	85	300	30	200	4,98	623	151	34,3	1,44
5	77,5	250	32,5	100	4,45	638	108	33,8	1,02
6	92,5	250	32,5	100	4,91	533	121	26,5	1,22
7	85	200	30	200	4,02	615	102	38,5	1,59
8	85	300	30	200	4,52	653	145	29,3	1,34
9	92,5	350	27,5	100	5,03	588	166	22,9	1,07
10	92,5	250	32,5	300	4,97	487	105	30,9	1,14
11	92,5	350	27,5	300	4,77	477	151	29,6	1,33

Окончание таблицы 1

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
12	92,5	350	32,5	100	3,64	574	160	29,8	1,08
13	77,5	250	27,5	100	3,86	732	135	38,5	1,05
14	77,5	350	32,5	100	4,11	585	113	30,6	0,98
15	85	300	30	200	4,06	632	141	30,3	1,14
16	77,5	350	27,5	100	5,08	688	148	22,1	1,18
17	85	300	30	200	4,78	662	143	38,3	1,54
18	77,5	250	27,5	300	4,93	598	152	54,1	0,99
19	92,5	250	27,5	100	4,05	579	116	41,5	1,11
20	85	300	30	200	4,03	642	146	34,3	1,14
21	77,5	250	32,5	300	4,29	601	101	36,6	1,88
22	85	300	30	200	4,98	636	148	30,3	1,39
23	85	300	25	200	5,17	626	145	24,9	1,02
24	77,5	350	27,5	300	8,08	534	158	34,9	1,51
25	77,5	350	32,5	300	5,98	582	124	48,1	1,89
26	100	300	30	200	4,44	438	120	26,7	1,12
27	85	300	30	0	4,69	616	148	37,9	1,07

Индекс водопоглощения — это объем, занимаемый гранулой или полимером крахмала после набухания в воде. В то время как индекс растворимости в воде определяет количество свободного полисахарида или высвобождения полисахарида из гранулы при добавлении избытка воды. Измельченный экструдат суспендировали в воде при комнатной температуре (28 ± 2 °C) в течение 30 минут и перемешивали, а затем центрифугировали при 3000 об/мин в течение 15 минут. Индекс водопоглощения представлял собой массу геля, полученного после удаления супернатанта, на единицу массы исходных сухих твердых веществ. Индекс растворимости в воде представлял собой вес сухих твердых веществ в супернатанте, выраженный в процентах от исходного веса образца.

Насыпная плотность образца определялась в трех повторностях. Образцы экструдата длиной 5 см помещались в мерный цилиндр объемом 500 мл и уплотнялись путем постукивания. Насыпная плотность образца определялась как масса экструдатов, деленная на объем и выражалась в кг/м^3.

Общая удельная механическая энергия была рассчитана (уравнение 1) на основе частоты вращения шнека (об/мин), крутящего момента двигателя (Н·м) и массового расхода (г/мин) по следующей формуле:

$$\text{УМЭ} = \frac{2\pi \cdot n \cdot T}{MR} \quad (1)$$

где n – частота вращения шнека, об/мин;
T – номинальный крутящий момент двигателя, Н·м;
MR – массовый расход, г/мин.

Потребление электроэнергии оценивали путем мониторинга электрического тока во время экспериментов по экструзии.

Суммарное содержание фенольных антиоксидантов было определено с помощью метода Фолина-Чокальтеу. Один миллилитр реагента ФЧ добавляли к 0,2 мл образца. Через 4 мин добавляли 0,8 мл насыщенного раствора Na_2CO_3 и инкубировали в течение 30 мин при комнатной температуре. Поглощение смеси измеряли при 765 нм на спектрофотометре Unico 1201. Результаты выражали в мг эквивалента галловой кислоты/100 г образца.

Содержание антоцианов в образце определялось с использованием дифференциальных методов pH. Поглощение образца измерялось при 515 и 700 нм на спектрофотометре Unico 1201. Содержание антоцианов рассчитывалось с использованием следующего уравнения:

$$SA = \frac{A \cdot M \cdot DF \cdot 1000}{e \cdot C} \quad (2)$$

где SA – содержание антоцианов, мг C3G/л;
A – поглощение, $(A_{515}\text{-}A_{700})_{pH1,0}\text{-}(A_{515}\text{-}A_{700})_{pH\ 4,5}$;
M – молекулярная масса цианидин-3-глюкозида (449,2);
DF – коэффициент разбавления образца;
e – молярная поглощательная способность цианидин-3-глюкозида (26 900);
C – концентрация буфера в мг/мл.

Коэффициент расширения экструдата определяли как отношение диаметра поперечного сечения образца к диаметру отверстия матрицы.

Состав образца определялся с точки зрения крахмала, пищевых волокон и белка. Крахмал (ГОСТ 10845-98 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения крахмала»), пищевые волокна (ГОСТ Р 54014-2010 «Продукты пищевые функциональные. Определение растворимых и нерастворимых пищевых волокон ферментативно-гравиметрическим методом») и белок (ГОСТ 10846-91 «Зерно и продукты его переработки») образца определялись стандартными методами.

План эксперимента представлял собой четырехфакторную вращающуюся центральную композитную конструкцию, которая была применена для исследования влияния температуры цилиндра, скорости шнека, влажности сырья и уровня вакуума на такие функции отклика, как индекс водопоглощения, насыпную плотность, удельную механическую энергию, общее содержание фенолов и коэффициент расширения. Было проведено 27 экспериментов для определения влияния переменных факторов и оптимальных значений параметров экструзии (таблица 1).

Планирование эксперимента и анализ результатов проводились с использованием программного обеспечения Statistica 10. Для всех статистических тестов уровень значимости был p <0,05. Для оптимизации использовался многоцелевой инструментарий оптимизации.

Результаты исследований. На рисунке 2 показано влияние переменных факторов экструзии на индекс водопоглощения экструдатов. Значения индекса водопоглощения экструдатов варьируются от 3,64 до 8,08 г/г, в то время как контрольный образец (без экструзии) имеет 3,33 г/г. Увеличение содержания влаги до 30% увеличивает индекс водопоглощения; однако обратная тенденция происходит после 30%. Индекс водопоглощения измеряет степень поглощения воды крахмалом после набухания в избытке воды и сохраняет целостность образца в водной дисперсии. Увеличение содержания влаги в смеси приводит к снижению индекса водопоглощения из-за результирующей смазки шнеков, следовательно, происходит снижение сдвига и трения, что приводит к меньшему испарению влаги и, в конечном итоге – к получению нерасширенной структуры. Температура цилиндра также вызывает снижение индекса водопоглощения из-за увеличения деградации и декстринизации крахмала.

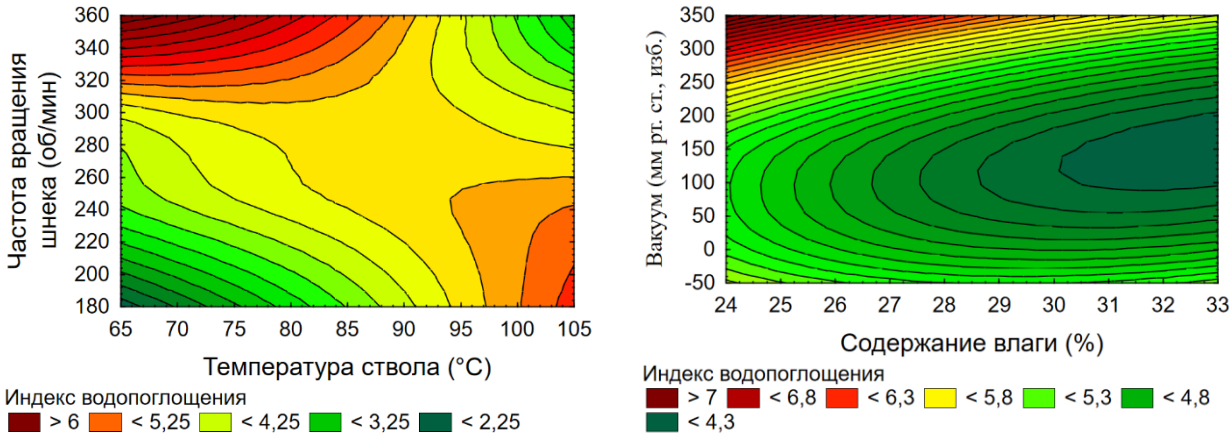

Рис. 2. Диаграммы влияния температуры цилиндра, частоты вращения шнека, влажности сырья и уровня вакуума на индекс водопоглощения

Индекс водопоглощения также уменьшается с ростом температуры цилиндра, если декстринизация или плавление крахмала преобладают над явлением желатинизации. Уровень вакуума также оказывает значительное влияние на индекс водопоглощения экструдатов. Увеличение вакуума способствует росту индекса водопоглощения возможно из-за образования пористой структуры, что приводит к увеличению поглощения воды. Однако частота вращения шнека оказывает отрицательное влияние на индекс водопоглощения. Это может быть связано с деградацией крахмала, которая вызывает снижение водоудерживающей способности молекул в результате уменьшения их размера.

На рисунке 3 показано влияние параметров экструзии на насыпную плотность экструдатов. Насыпная плотность экструдатов варьировалась от 438 до 732 кг/м^3. Все независимые параметры оказали значительное влияние на насыпную плотность с высоким коэффициентом детерминации (0,85). Насыпная плотность экструдата уменьшалась с увеличением температуры цилиндра. Во время экструзии повышение температуры цилиндра увеличивает количество перегретого пара, который интенсифицирует образование пузырьков и снижает вязкость расплава, что способствует образованию продукта с низкой насыпной плотностью.

Повышение уровня вакуума, по-видимому, снижает насыпную плотность экструдатов. Если применяется вакуум, то влага, присутствующая в смеси, испаряется при низкой температуре, так что объем экструдатов увеличивается, что приводит к снижению насыпной плотности. Увеличение уровня вакуума также способствует росту количества пузырьков воздуха, присутствующих в смеси, что приводит к снижению насыпной плотности.

Насыпная плотность образца повышается с увеличением содержания влаги. Молекулярная структура амилопектина изменяется из-за содержания влаги во время экструзии ингредиентов смеси, и, таким образом, эластичность расплава уменьшается, его выход влиял на желатинизацию и, таким образом, уменьшал расширение и увеличивал плотность экструдата. Частота вращения шнека также влияет на насыпную плотность экструдатов: ее рост способствует увеличению насыпной плотности. Это связано с тем, что увеличение частоты вращения шнека во время обработки сокращает время пребывания сырья в экструдере и, таким образом, уменьшает степень желатинизации крахмала и снижает его водоудерживающую способность, что приводит к увеличению насыпной плотности получаемого экструдата.

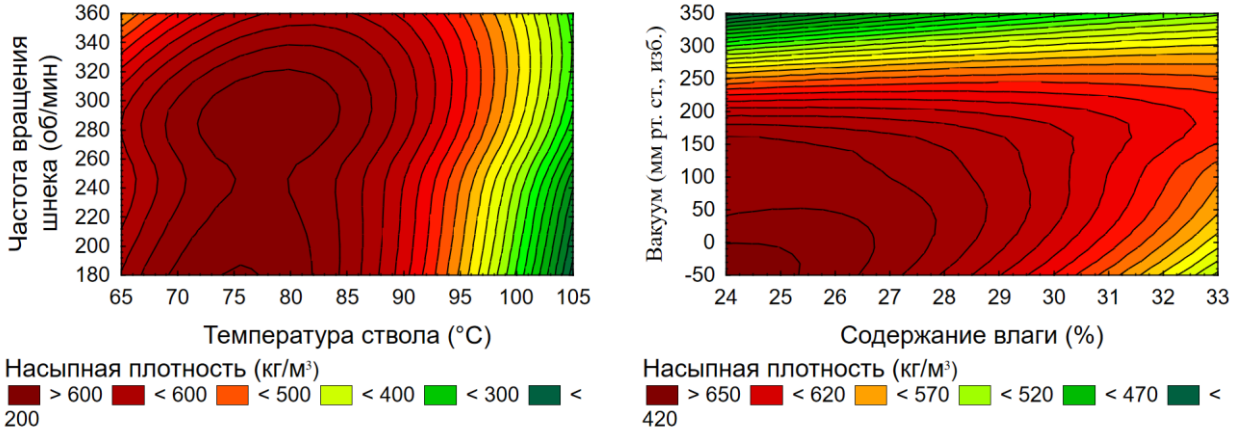

Рис. 3. Диаграммы влияния температуры цилиндра, частоты вращения шнека, влажности сырья и уровня вакуума на насыпную плотность

Удельная механическая энергия представляет собой энергию, поступающую в систему экструзии через вязкую диссипацию, и ее количество варьировалось от 101 до 166 кДж/кг. Содержание влаги в корме оказывает значительное влияние на удельную механическую энергию. Увеличение содержания влаги в смеси значительно снижает удельную механическую энергию процесса экструзии (рисунок 4). Высокое содержание влаги в смеси подразумевает смазочный эффект, что приводит к снижению потребности в энергии и, следовательно, снижает удельную механическую энергию. Повышение температуры экструзии также снижает удельную механическую энергию. Высокотемпературная экструзия облегчает преобразование твердого потока в вязкоупругий поток, в основном за счет желатинизации крахмала. Таким образом, она снижает вязкость расплава, что, в свою очередь, снижает удельную механическую энергию. Частота вращения шнека приводит к значительному увеличению удельной механической энергии процесса экструзии, поскольку оба эти показателя находятся в линейной зависимости. Вместе с этим применяемый вакуум не оказывает существенного влияния на удельную механическую энергию.

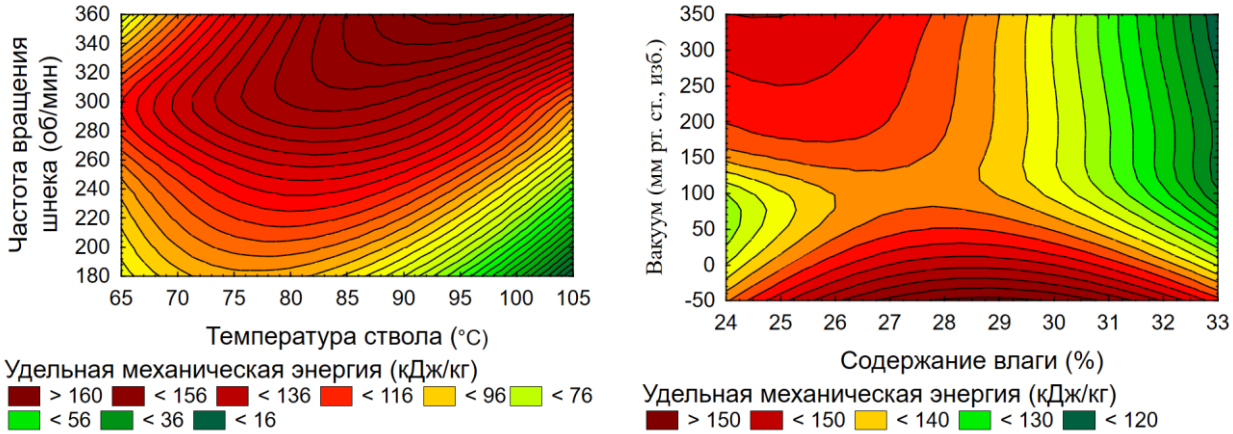

Рис. 4. Диаграммы влияния температуры цилиндра, частоты вращения шнека, влажности сырья и уровня вакуума на удельную механическую энергию

Общее содержание фенолов в экструдатах варьировалось от 20,1 до 54,1 мг GAE/100 г. На рисунке 5 показано, что увеличение влажности исходного сырья приводит к увеличению общего содержания фенолов экструдированного продукта. Увеличение содержания влаги снижает трение и сдвиговые силы во время экструзии, что приводит к снижению нагрева, так что удержание фенольных соединений увеличивается. Увеличение фенольных соединений в экструдированной смеси можно объяснить увеличением свободных форм из-за разрушения клеточной стенки во время экструзии. Увеличение температуры цилиндра изначально увеличивает общее содержание фенолов, но показывает обратную тенденцию на более поздней стадии. Во время начальной термической обработки повреждения клеточных структур позволяют легче извлекать растворимые фенольные соединения из сырья, таким образом, общее количество фенольных соединений увеличивается. Однако при дальнейшем повышении температуры экструзии общее содержание фенолов уменьшается из-за термической деградации фенольных соединений. Общее содержание фенолов уменьшается в экструдированной смеси во время экструзии, особенно при повышении температуры экструзии со 100 до 120 °C. Увеличение уровня вакуума немного снижает общее содержание фенолов в экструдатах. Возможно, потому что при вакууме имеется уменьшенное количество перегретого пара, присутствующего в расплаве, и тем самым регулируется потеря фенольных соединений из-за увеличения температуры. Увеличение частоты вращения шнека обеспечивает более высокое трение и сдвигающие силы, так что выделяется больше тепла, что приводит к разрушению фенольных соединений.

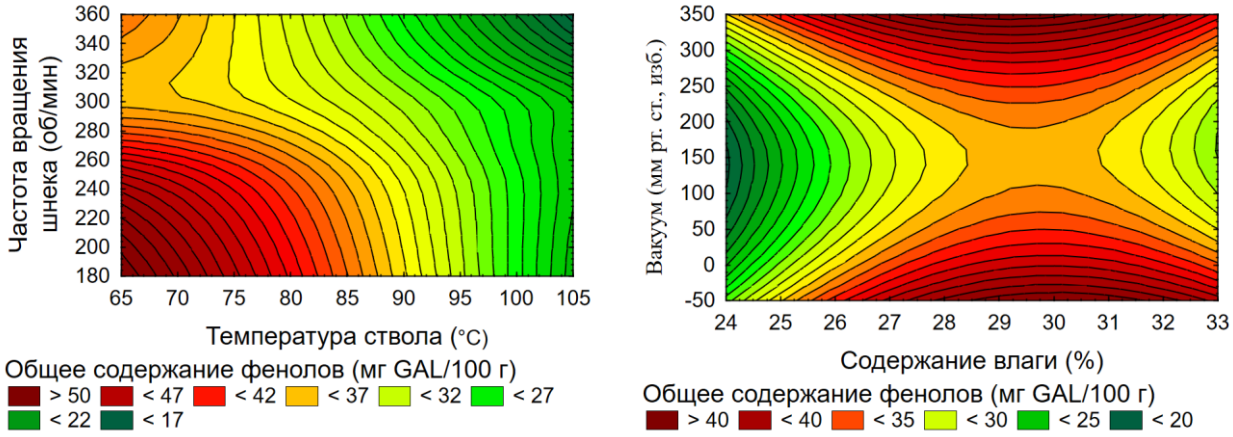

Рис. 5. Диаграммы влияния температуры цилиндра, частоты вращения шнека, влажности сырья и уровня вакуума на общее содержание фенолов

На коэффициент расширения экструдата значительно влияли параметры процесса вакуумной экструзии (рисунок 6). Температура цилиндра, влажность, частота вращения шнека и вакуум оказывают значительное влияние на коэффициент расширения, имея высокий коэффициент детерминации (0,88), а значения коэффициента расширения варьируются от 0,98 до 1,89. Повышение температуры цилиндра и вакуума значительно увеличивает коэффициент расширения готового продукта. Коэффициент расширения в основном зависит от степени желатинизации. Повышение температуры экструзии снижает вязкость смеси, что усиливает образование пузырьков во время экструзии. Более того, степень перегрева пара в экструдере может увеличиваться при более высокой температуре, что способствует улучшенному расширению. Коэффициент расширения экструдатов увеличивается с содержанием влаги в сырье до определенного предела, за которым происходит обратная тенденция. Степень желатинизации крахмала увеличивается с содержанием влаги в сырье до 30%, что увеличивает коэффициент расширения. Дальнейшее увеличение влажности сырья обеспечивает смазочный эффект и снижает эластичность расплава, так что коэффициент расширения уменьшается. Значительное влияние уровня вакуума на коэффициент расширения возможно связано с падением давления, вызывающим обширное вытеснение водяного пара из расплава, таким образом, он появляется в виде пузырьков и обеспечивает расширение расплавленных экструдатов, вызывая увеличение объема экструдатов. Расширение экструдата зависит от разницы давления между матрицей и атмосферой, а также от способности выходящего продукта поддерживать расширение. Частота вращения шнека оказывает умеренное влияние на расширение. Увеличение частоты может вызвать деградацию структуры амилопектина и изменить реологию расплава сырья, что влияет на расширение продукта.

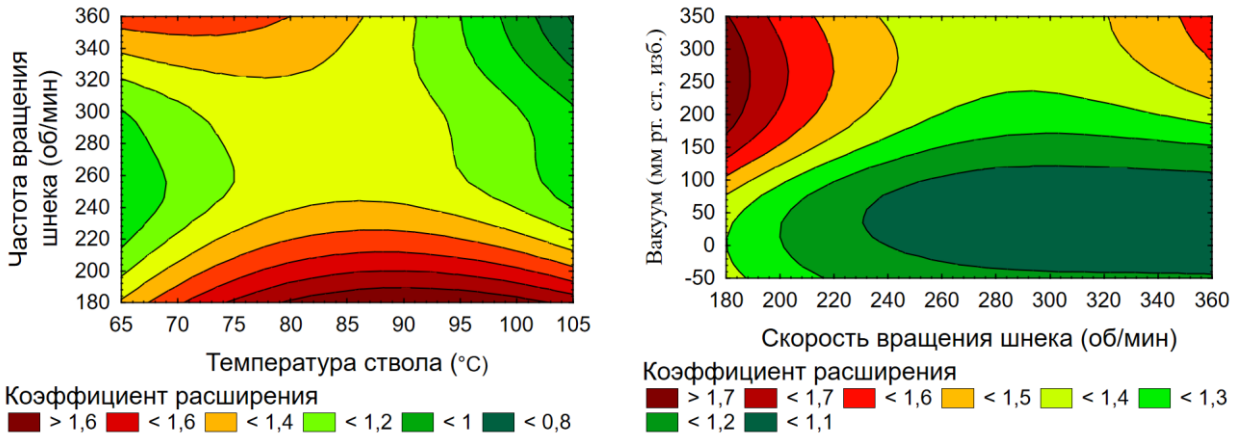

Рис. 6. Диаграммы влияния температуры цилиндра, скорости шнека, влажности сырья и уровня вакуума на коэффициент расширения

Вакуумная экструзия сравнивалась с обычной экструзией при оптимальных условиях. Было отмечено, что без вакуума экструдат имел более низкий коэффициент расширения. При термовакуумной экструзии из-за более высокого перепада давления после фильеры происходило обширное удаление водяного пара из расплава, что усиливало расширение расплавленного экструдата и, таким образом, увеличивало объем экструдатов. Однако насыпная плотность 616 кг/м^3 и индекс водопоглощения 4,69 г/г были выше для обычных экструдатов. В присутствии вакуума скорость испарения влаги из сырья увеличивается даже при низкой температуре. Следовательно, увеличивается объем экструдата и происходит образование пористой структуры. Твердость экструдата была ниже (152 Н), чем у обычного экструдата (162 Н). Поскольку пористость экструдата, полученного с помощью вакуума, была выше, твердость была ниже по сравнению с обычным экструдатом.

Исследование физико-химических свойств показало, что экструдат смеси ржи и пажитника, полученный с помощью термовакуумной экструзии, содержал 0,02 мг/100 г C3G и 3,2 мг/100 г P3G, тогда как обычный экструдат содержал 0,01 мг/100 г C3G и 1,92 мг/100 г P3G. Содержание антоциана составило 3,9 мг C3G/л, а индекс растворимости в воде – 2,8%. Результат обозначил превосходство термовакуумной экструзии над обычной.

Заключение. Экструдированная кормовая смесь на основе ржи и пажитника была получена с использованием термовакуумной экструзии, рабочие параметры которой оценивались и подвергались оптимизации с использованием регрессионной модели поверхности отклика. Анализ полученной модели позволяет рекомендовать для этого вида термопластической технологии следующие оптимальные параметры: температура цилиндра 77,5 °C, влажность смеси 32,5 %, частота вращения шнека 350 об/мин и уровень вакуума 300 мм рт. ст. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что термовакуумная экструзия оказывает более заметное влияние на коэффициент расширения, насыпную плотность и индекс водопоглощения экструдатов по сравнению с обычной экструзией. Полученный в экспериментах экструдат содержал значимое для организма животных количество антоцианов C3G, P3G и других полезных веществ, обычно разрушающихся под действием высоких температур «классической» горячей экструзии. Таким образом, можно сделать вывод, что термовакуумная экструзия является эффективным способом получения экструдатов из зерновых культур с целью получения кормов с высоким содержанием фитохимических веществ.

Список источников

1. Алферников О. Ю., Щубко А. С. Технология и оборудование экструзионной обработки животного и растительного сырья // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2007. №. 3. С. 87-89.

2. Бахарев, В. В., Воронина, М. С., Гуляева, А. Н., Нафикова, О. А. Исследование физико-химических показателей свекольных выжимок после их дегидратации с последующей экструзией // Индустрия питания/Food Industry. 2022. Т. 7. №. 3. С. 25-31.

3. Бахчевников О. Н., Брагинец С. В. Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор) //Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. №. 4. С. 690-706.

4. Белов, А. Г., Шахов, В. А., Путрин, А. С., Козловцев, А. П., Филатов, М. И., Борулько, В. Г. Инновационная разработка технологии и оборудования для производства экструдированных кормов с ультрадисперсными частицами // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 5 (79). С. 155-158.

5. Бурмага А. В., Крючков А. М. Основы теории процесса экструдирования кормов // Механизация и электрификация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. 2016. С. 95-100.

6. Годжиев Р. С., Гогаев О. К., Тукфатулин Г. С. Повышение молочной продуктивности коров при использовании в рационе высокоэнергетических кормов // Известия Горского государственного аграрного университета. 2018. Т. 55. № 3. С. 37-41.

7. Зарудный В. А., Бардаш В. В. Использование нетрадиционных кормов в кормлении птицы // Эффективное животноводство. 2024. №. 3 (193). С. 92-95.

8. Коробов В. П., Ситников В. А., Славнов Е. В. Экструзия озимой ржи − один из путей развития кормовой базы на Урале // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2009. № 3. С. 56-63.

9. Минаева Л. В., Минаева Т. В., Кравцова Е. В. Ресурсосберегающие технологии переработки комбикормов с использованием процесса экструзии //Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности. 2013. С. 374-377.

10. Минаева Л. В., Алексеев Г. В., Синявский Ю. В. Математическое моделирование процесса динамической экструзии при производстве высокобелковых продуктов // The refrigerant's future: the phase down of hfcs and its consequences. С. 330.

11. Николаев В. Н., Яворский В. И. Анализ процесса экструзии кормов и совершенствование экструдера // Вестник ЧГАА. 2015. Т. 71. С. 61-66.

12. Передня В. И., Барановский И. В., Чумаков В. В. Экструзионные технологии в кормопроизводстве // Техника и технологии в животноводстве. 2015. №. 4 (20). С. 60-63.

13. Сложенкина М., Суторма О. Влияние нетрадиционных кормов на показатели безопасности и пищевой адекватности мясного сырья // Молочное и мясное скотоводство. 2013. № 8. С. 30-31.

14. Фролов, В. Ю., Сысоев, Д. П., Припоров, И. Е., Горб, С. С. Технологии и технические средства приготовления концентрированных кормов с использованием соевого белка // World science. 2016. Т. 1. № 3 (7). С. 53-58.

15. Челомбитько М. А., Корко В. С., Назаренко Р. А. Применение сверхкритического диоксида углерода при экструзии в пищевой промышленности // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции. 2021. С. 61-63.

16. Шелюто Б. В., Нестерова И. М. Пажитник греческий (Trigonella foenum graecum L.) – перспективная кормовая культура для Беларуси // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 1. С. 88-91.

17. Bamidele O. P., Emmambux M. N. Encapsulation of bioactive compounds by «extrusion» technologies: A review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. Т. 61. № 18. С. 3100-3118.

18. Iqbal A., Hosseini A. F., Rizvi S. S. H. Supercritical fluid extrusion of dairy and fruit products to generate GOS-enriched and nutritionally superior snack puffs // Food and Bioproducts Processing. 2024. Т. 147. С. 441-448.

19. Kurmanov A. K., Kabdusheva A. S. Обоснование конструкции шнека экструдера для производства кормов // Bulletin of Science of the Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin. 2021. № 4 (111). С. 90-96.

20. Manzoor S. et al. The use of extrusion technology for encapsulation of bioactive components for their improved stability and bioavailability // Nutrition & Food Science. 2023. Т. 53. № 6. С. 959-976.

References

1. Alfernikov, O. Yu., & Shchubko, A. S. (2007). Technology and equipment for extrusion processing of animal and plant raw materials. News of higher educational institutions. Food technology, (3), 87-89. (in Russ.).

2. Bakharev, V. V., Voronina, M. S., Gulyaeva, A. N., & Nafikova, O. A. (2022). Study of physicochemical parameters of beet pomace after their dehydration followed by extrusion. Food Industry, 7(3), 25-31. (in Russ.).

3. Bakhchevnikov, O. N., & Braginets, S. V. (2020). Extrusion of plant raw materials for food products (review). Food Production Engineering and Technology, 50(4), 690-706. (in Russ.).

4. Belov, A. G., Shakhov, V. A., Putrin, A. S., Kozlovtsev, A. P., Filatov, M. I., & Borulko, V. G. (2019). Innovative development of technology and equipment for the production of extruded feed with ultrafine particles. Bulletin of the Orenburg State Agrarian University, (5 (79)), 155-158. (in Russ.).

5. Burmaga, A. V., & Kryuchkov, A. M. (2016). Fundamentals of the theory of the feed extrusion process. In Mechanization and electrification of technological processes in agricultural production (pp. 95–100). (in Russ.).

6. Godzhiev, R. S., Gogaev, O. K., & Tukfatulin, G. S. (2018). Increasing milk productivity of cows when using high-energy feed in the diet. Bulletin of the Gorsk State Agrarian University, 55(3), 37-41. (in Russ.).

7. Zarudny, V. A., & Bardash, V. V. (2024). Use of non-traditional feeds in poultry feeding. Effective Animal Husbandry, (3 (193)), 92-95. (in Russ.).

8. Korobov, V. P., Sitnikov, V. A., & Slavnov, E. V. (2009). Winter rye extrusion − one of the ways of developing the forage base in the Urals. Bulletin of the Perm Federal Research Center, (3), 56-63. (in Russ.).

9. Minaeva, L. V., Minaeva, T. V., & Kravtsova, E. V. (2013). Resource-saving technologies for processing compound feed using the extrusion process. In Technologies and equipment for chemical, biotechnological and food industries (pp. 374-377). (in Russ.).

10. Minaeva, L. V., Alekseev, G. V., & Sinyavskiy, Yu. V. Mathematical modeling of the dynamic extrusion process in the production of high-protein products. The refrigerant's future: the phase down of hfcs and its consequences, 330. (in Russ.).

11. Nikolaev, V. N., & Yavorsky, V. I. (2015). Analysis of the feed extrusion process and improvement of the extruder. Bulletin of the ChGAA, 71, 61-66. (in Russ.).

12. Perednya, V. I., Baranovsky, I. V., & Chumakov, V. V. (2015). Extrusion technologies in feed production. Machinery and technology in animal husbandry, (4 (20)), 60-63. (in Russ.).

13. Slozhenkina, M., & Sutorma, O. (2013). The influence of non-traditional feeds on the safety and nutritional adequacy of meat raw materials. Dairy and beef cattle breeding, (8), 30-31. (in Russ.).

14. Frolov, V. Yu., Sysoev, D. P., Priporov, I. E., & Gorb, S. S. (2016). Technologies and technical means for the preparation of concentrated feeds using soy protein. World science, 1(3 (7)), 53-58. (in Russ.).

15. Chelombitko, M. A., Korko, V. S., & Nazarenko, R. A. (2021). Application of supercritical carbon dioxide in extrusion in the food industry. In Processing and quality management of agricultural products (pp. 61-63). (in Russ.).

16. Shelyuto, B. V., & Nesterova, I. M. (2011). Greek fenugreek (Trigonella foenum graecum L.) – a promising forage crop for Belarus. Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy, (1), 88-91. (in Russ.).

17. Bamidele, O. P., & Emmambux, M. N. (2021). Encapsulation of bioactive compounds by “extrusion” technologies: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61(18), 3100-3118.

18. Iqbal, A., Hosseini, A. F., & Rizvi, S. S. (2024). Supercritical fluid extrusion of dairy and fruit products to generate GOS-enriched and nutritionally superior snack puffs. Food and Bioproducts Processing, 147, 441-448.

19. Kurmanov, A. K., & Kabdusheva, A. S. (2021). Justification of the design of the extruder screw for feed production. Bulletin of Science of the Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, (4 (111)), 90-96.

20. Manzoor, S., Hussain, S. Z., Amin, T., Bashir, O., Naseer, B., Jabeen, A., ... & Khan, U. (2023). The use of extrusion technology for encapsulation of bioactive components for their improved stability and bioavailability. Nutrition & Food Science, 53(6), 959-976.

Информация об авторах

Д. И. Фролов – кандидат технических наук, доцент;
А. А. Курочкин – доктор технических наук, профессор;
М. А. Потапов – аспирант.

Information about the authors

D. I. Frolov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
A. A. Kurochkin – Doctor of Technical Sciences, Professor;
M. A. Potapov – post-graduate student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 6.09.2024; одобрена после рецензирования 4.10.2024; принята к публикации 16.10.2024.
The article was submitted 6.09.2024; approved after reviewing 4.10.2024; accepted for publication 16.10.2024.