

Рациональные параметры термовакуумной экструзии овса

Куручкин А.А., Новикова О.А., Соколова Н.Н.

Аннотация. Исследованиями установлено, что снижение давления в вакуумной камере и увеличение времени выдержки экструдата способствуют повышению его пористости, а также обезвоживанию продукта до оптимального уровня влажности (8-10%). Основными факторами, влияющими на пористость экструдата овса, являются влажность исходного сырья, давление в вакуумной камере и время его воздействия. Проведённый факторный эксперимент и построенная регрессионная модель подтвердили высокую степень объяснённости влияния указанных факторов на результат, при этом время выдержки и влажность оказались наиболее значимыми. Анализ откликов показал, что наибольшей пористости (83-85%) удаётся достичь при давлениях 30-50 кПа, влажности 14-22% и времени выдержки 18-26 с. При превышении этих значений наблюдается эффект насыщения или даже снижение пористости, что подчёркивает важность соблюдения рациональных параметров. Разработанная модель может эффективно использоваться для управления процессом термовакуумной экструзии с целью повышения качества и энергоэффективности готового продукта.

Ключевые слова: термовакуумная экструзия, вакуумная камера, овес, пористость, уравнение регрессии, рациональные параметры.

Для цитирования: Куручкин А.А., Новикова О.А., Соколова Н.Н. Рациональные параметры термовакуумной экструзии овса // Инновационная техника и технология. 2025. Т. 12. № 2. С. 33–40.

Rational parameters of thermal vacuum extrusion of oats

Kurochkin A.A., Novikova O.A., Sokolova N.N.

Abstract. The studies have shown that decreasing the pressure in the vacuum chamber and increasing the holding time of the extrudate contribute to an increase in its porosity, as well as dehydration of the product to the optimum moisture level (8-10%). The main factors affecting the porosity of the oat extrudate are the moisture content of the feedstock, the pressure in the vacuum chamber and the time of its exposure. The conducted factorial experiment and the constructed regression model confirmed a high degree of explanation of the influence of these factors on the result, while the holding time and humidity were the most significant. The response analysis showed that the highest porosity (83-85%) can be achieved at pressures of 30-50 kPa, humidity of 14-22% and a holding time of 18-26 seconds. When these values are exceeded, the saturation effect or even a decrease in porosity is observed, which emphasizes the importance of observing rational parameters. The developed model can be effectively used to control the thermal vacuum extrusion process in order to improve the quality and energy efficiency of the finished product.

Keywords: thermal vacuum extrusion, vacuum chamber, oats, porosity, regression equation, rational parameters.

For citation: Kurochkin A.A., Novikova O.A., Sokolova N.N. Rational parameters of thermal vacuum extrusion of oats. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2025. Vol. 12. No. 2. pp. 33–40. (In Russ.).

Введение

Одним из путей реализации наукоемких технологий в пищевой индустрии считается повышение качества продукции при выработке конкретного продукта, а также улучшения функционально-технологических свойств сельскохозяйственного сырья в процессе его выращивания и переработки. Рациональным алгоритмом решения задач, связанных с этим направлением, является обоснованный выбор самого сырья и методов его обработки.

В части выбора сырья для пищевых продуктов особое внимание заслуживает овес. Набор его полезных свойств особенно интересен с позиции обогащения хлебобулочных изделий. В частности, зерно овса характеризуется оптимальным соотношением белка, богатого лейцином (8,1 г/100 г белка), валином (7,8 г/100 г белка), фенилаланином (6,5 г/100 г белка), изолейцином (5,2 г/100 г белка), треонином (3,8 г/100 г белка), лизином (3,9 г/100 г белка), метионином (2,0 г/100 г белка) и триптофаном (1,7 г/100 г белка). Благодаря хорошей сбалансированности аминокислот, овес имеет лучшие диетические свойства по сравнению с другими злаковыми культурами [5].

Овес является хорошим источником липидов, большая часть которых представлена в форме полиненасыщенных жирных кислот, в основном, олеиновой и линолевой.

В зерне овса находятся разнообразные углеводы: моносахара (пентозы, гексозы), дисахариды, крахмал, гемицеллюлозы, клетчатка и др. В крахмальном эндосперме основными сахарами являются сахароза и раффиноза. Представителями полисахаридов являются крахмал, клетчатка, гемицеллюлозы.

Крахмал овса представляет собой крупные сложносоставные гранулы, состоящие из множества отдельных мелких, которые имеют форму многогранников размером 3-10 мкм и клейстеризуется при температуре 53-59 °С. Такой крахмал хорошо переносит влажную термопластическую экструзию с относительно не высокой рабочей температурой экструдера [5].

Известно, что рациональные технологические показатели процесса переработки растительного сырья обычно выбираются в зависимости от макронутриента, концентрация которого в обрабатываемом материале наибольшая, и корректируются с учетом минимально допустимой деструкции остальных значимых компонентов сырья.

Например, для крахмалсодержащего растительного сырья, к числу которого относится овес, технологические параметры должны обеспечить рациональную степень клейстеризации (желатинизации) крахмала, что возможно, если учитывать как минимум влажность экструдруемого материала и температуру в тракте экструдера.

Известно, что крахмал зерна может быть полностью клейстеризован при температуре, близкой к

120 °С и влажности обрабатываемого сырья 20-30 %. При влажности обрабатываемого сырья менее 20 % полная клейстеризация крахмала возможна при температуре, значительно выше указанной величины [1, 3].

Более детальный анализ высокотемпературной экструзии свидетельствует, что наиболее существенные изменения крахмальных зерен происходят в момент выхода сырья из фильеры экструдера. Именно в момент декомпрессии снижается общее содержание крахмала в связи с расщеплением амилозы и амилопектина и повышается количество олигосахаридов и декстринов. Декстринизация крахмала в этом случае обуславливает уменьшение плотности экструдруемого материала и образование микропористой структуры, что очевидно при анализе органолептических показателей экструдата [6, 9].

Параметры высокотемпературной сухой экструзии губительны и для большинства витаминов и других термолабильных ингредиентов овса и другого подобного сырья растительного происхождения, что существенно ограничивает возможности этой технологии.

С другой стороны наглядным и весьма эффективным вектором развития термопластической экструзии растительного сырья является ее вакуумная разновидность. Уникальные возможности этой технологии связаны как с широким выбором видов обрабатываемого сырья, а также возможностью управляемого преобразования компонентов, из которых оно состоит.

По этому способу экструзия может осуществляться при высоком содержании влаги, умеренных температурах и относительно мягких условиях механических напряжений (сдвига) обрабатываемого сырья. Такие рабочие параметры экструзионного процесса весьма выгодны с позиции сохранения термо- и механически чувствительных компонентов сырья. Важной особенностью термовакуумной экструзии является то, что часть энергии, затрачиваемой на процесс механического воздействия на сырье, замещается на энергию непрямого вакуумного процесса, который позволяет повысить энергоэффективность процесса экструзии, исключить сушку готового продукта, а также обеспечить более мягкое воздействие на термолабильные ингредиенты перерабатываемого сырья [2, 4, 5, 8, 10, 11, 12].

Целью работы является обоснование рациональных параметров термовакуумной экструзии овса на основе экспериментальных исследований и анализа полученной математической модели.

Объекты и методы исследования

Экспериментальные исследования выполнялись с помощью одношнекового пресс-экструдера, модернизированного согласно патенту на полезную модель №198739 «Экструдер с вакуумной камерой» [7].

Объект исследования – зерна овса, которые подвергали экструдированию при температуре 100-105 °С с последующим воздействием на выходящее из фильеры матрицы экструдера сырье пониженным давлением равным 0,03-0,07 МПа в течение 10-30 с. Частота вращения шнека пресс-экструдера составляла 7,5 с⁻¹, диаметр фильеры матрицы экструдера – 4 мм.

Результаты и их обсуждение

В качестве исследуемых были выбраны следующие факторы: влажность экструдированного овса – В (%), давление в вакуумной камере экструдера – Р (кПа) и время выдержки экструдата в вакуумной камере – t (с). За критерий качества полученного экструдата была принята его пористость П (%). Матрица планирования и результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Методика определения пористости получаемых экструдатов заключается в следующем: образцы экструдата длиной 10 мм покрывались водостойким лаком и после высыхания помещались в цилиндр с водой. С учетом массы вытесненной из цилиндра воды, определялся объем образца экструдата с порами. Затем образец экструдата подвергался сжатию с помощью ручных тисков, после чего также замерялся его объем. Пористость экструдата (%) определялась по формуле

$$П = \left(1 - \frac{V_6}{V_n} \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где V_n – объем экструдата с порами, мм³;

V_6 – объем экструдата после сжатия образца, мм³.

Уравнение регрессии зависимости пористости от влажности экструдированного овса (В), давления в вакуумной камере экструдера (р) и времени выдержки экструдата в вакуумной камере (t):

$$П = 19,7987 + 1,4291 \cdot В - 0,0422 \cdot В^2 + 0,4069 \cdot p - 0,0062 \cdot p^2 + 3,1332 \cdot t - 0,0611 \cdot t^2 + 0,0152 \cdot В \cdot p - 0,0278 \cdot В \cdot t + 0,0061 \cdot p \cdot t \quad (2)$$

Как видно из полученной модели наиболее существенное влияние на пористость получаемого экструдата овса оказывают время выдержки экструдата в вакуумной камере (t) и влажность экструдированного овса (В).

Анализ уравнения (2), показывает, что при нулевых значениях исследуемых факторов пористость будет равна 19,9% при этом стандартной ошибке 9,5. Это свидетельствует о довольно высокой неопределённости при оценке показателя модели.

Коэффициент при факторе В=1,4291 указывает на положительное влияние влажности экструдированного овса на пористость. При увеличении влажности экструдированного овса, пористость увеличивается на 1,4291%. Однако стандартная ошибка (0,6158)

Таблица 1 – Матрица планирования и результаты эксперимента

Система опытов	№ опыта	Кодированные факторы			Натуральные факторы			Пористость (П)
		X ₁	X ₂	X ₃	В	Р	t	
Полный факторный эксперимент типа 2 ³	1	-1	-1	-1	14	30	10	68
	2	-1	-1	1	14	30	30	76,7
	3	-1	1	-1	14	70	10	70
	4	-1	1	1	14	70	30	84,6
	5	1	-1	-1	22	30	10	68,2
	6	1	-1	1	22	30	30	73,5
	7	1	1	-1	22	70	10	76,1
	8	1	1	1	22	70	30	85,2
Опыты в «звездных» точках	9	-1,68	0	0	16,59	50	20	85
	10	1,68	0	0	33,41	50	20	76,3
	11	0	-1,68	0	18	10,64	20	67
	12	0	1,68	0	18	17,36	20	73,5
	13	0	0	-1,68	18	50	17,27	79
	14	0	0	1,68	18	50	30,73	83,4
Опыты в центре плана	15	0	0	0	18	50	20	85
	16	0	0	0	18	50	20	85
	17	0	0	0	18	50	20	85
	18	0	0	0	18	50	20	85
	19	0	0	0	18	50	20	85
	20	0	0	0	18	50	20	85

Таблица 2 – Характеристика качества модели

	Множест. - R	Множест. - R ²	Скоррект - R ²	SS - Модель	сс - Модель	MS - Модель	SS - Остаток	сс - Остаток	MS - Остаток	F	p
Пористость (П)	0,989	0,978	0,957	864,840	9	96,093	19,837	10	1,984	48,440	0

и доверительные интервалы (0,057 до 2,801) показывают, что влияние может варьироваться.

Коэффициент при факторе В2= - 0,0422 имеет отрицательное значение, что свидетельствует о том, что эффект влияния влажности экструдированного овса на пористость уменьшается при очень высоких значениях влажности.

Коэффициент в модели регрессии $r=0,4069$ показывает, что с увеличением давления на 1 кПа, пористость увеличивается на 0,4069%. Однако влияние давления на пористость постепенно уменьшается, поскольку коэффициент при квадратичном члене $r^2=-0,0062$ также отрицательно влияет на пористость, что предполагает, что при слишком высоком давлении увеличение пористости может замедляться.

Коэффициент при факторе $t=3,1332$ указывает на положительное влияние времени выдержки на пористость. При увеличении времени выдержки на 1 секунду, пористость увеличивается на 3,1332%.

Коэффициент при квадратичном члене фактора времени выдержки экструдата в вакуумной камере $t^2=-0,0611$ подтверждает, что с увеличением времени выдержки эффект на пористость будет ослабевать, что говорит о возможном насыщении материала при длительном воздействии.

Факторное взаимодействие между влажностью экструдированного овса и давлением в вакуумной камере экструдера ($B \cdot p = 0,0152$) также положительно влияет на пористость, что означает, что при увеличении как влажности, так и давления, пористость будет увеличиваться.

Взаимодействие между влажностью экструдированного овса и временем выдержки экструдата в вакуумной камере ($B \cdot t = -0,0278$) оказывает отрицательное влияние на пористость. Это может означать, что при определённых значениях влажности и времени, повышение может привести к уменьшению пористости.

Взаимодействие между давлением и временем выдержки экструдата в вакуумной камере ($p \cdot t = 0,0061$) имеет положительное влияние, что говорит о возможной синергии между давлением и временем выдержки для повышения пористости. Оценку качества модели и остатков на основе данных таблицы 2 можно представить следующим образом.

Значение коэффициента корреляции $R=0,9887$ и коэффициента детерминации $R^2=0,9776$ указывают на высокую степень описания модели. Это означает, что модель хорошо объясняет 97,76% вариации пористости. Такой высокий коэффициент детерминации свидетельствует о том, что модель адекватно описывает зависимость пористости от выбранных факторов.

Скорректированное $R^2=0,9574$ подтверждает, что модель не переобучена и остаётся стабильной при учёте количества переменных. Это значение немного ниже, чем коэффициент детерминации (R^2), что указывает на то, что дополнительные параметры в модели не привели к переоценке её качества.

Сумма квадратов модели $SS\text{-Модель}=864,8401$ значительно больше, чем сумма квадратов остатков $SS\text{-Остаток}=19,8374$, что указывает на то, что модель объясняет большую часть вариации в данных, оставляя лишь небольшие остаточные ошибки.

Среднеквадратичная ошибка для модели $MS\text{-Модель}=96,0933$ и для остатков $MS\text{-Остаток}=10$ показывают, что ошибка модели относительно мала по сравнению с общей вариацией, что свидетельствует о высоком качестве модели.

Значение критерия Фишера $F=48,4404$ и очень низкий уровень значимости $p=0,0000$ подтверждают статистическую значимость модели. Это означает, что модель значительно лучше случайных предсказаний и её параметры достоверны.

Модель демонстрирует приемлемые показатели качества: высокая степень объяснённости вариации пористости, малая ошибка остатков и значимость модели на уровне статистических тестов. Это свидетельствует о том, что выбранная модель адекватно описывает зависимость пористости от факторов и является эффективной для анализа данных.

Более подробную информацию о влиянии исследуемых параметров на пористость экструдата овса можно получить путем изучения свойств поверхности отклика на основе канонического преобразования полученной математической модели. Анализ осуществлен с помощью двумерных сечений.

Зависимость пористости экструдата овса от его влажности и величины давления в вакуумной камере термовакуумного экструдера описывается уравнением (3)

$$P = 46,6281 + 1,3186 \cdot B + 0,7657 \cdot p - 0,0503 \cdot B^2 + 0,0152 \cdot B \cdot p - 0,0093 \cdot p^2 \quad (3)$$

Пористость повышается с увеличением давления (p) и влажности (B). Максимальные значения пористости (около 82,93%) наблюдаются при высоком давлении (p около 50-60 кПа) и высокой влажности (B около 20-22%). Это может указывать на то, что исследуемые факторы способствуют образованию более пористых структур при экструзии.

Влияние давления (p) на экструзионный процесс выглядит следующим образом. При низком давлении (p около 10-20 кПа) пористость существенно ниже (около 67%). Влияние давления на пористость проявляется в том, что с его увеличени-

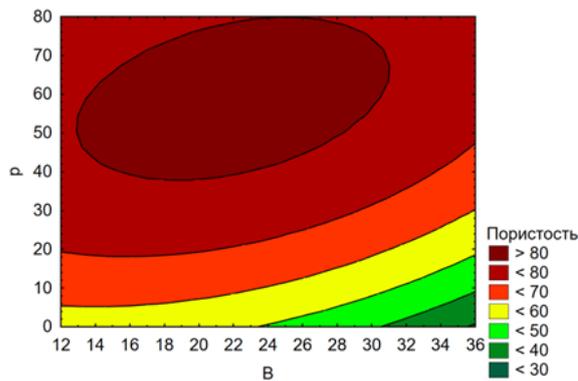


Рис. 1. Карты линий уровня для пористости (Π) в зависимости от давления (p) и влажности (B)

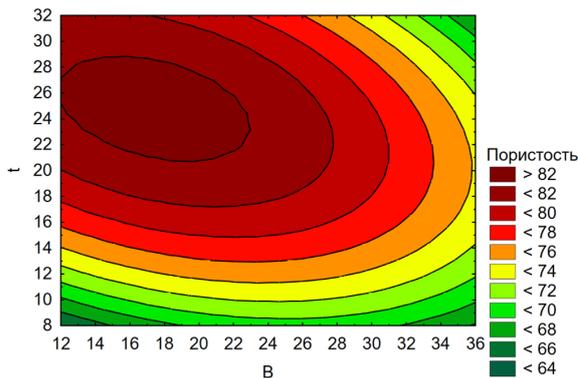


Рис. 2. Карта линий уровня для пористости (Π) в зависимости от влажности (B) и времени (t)

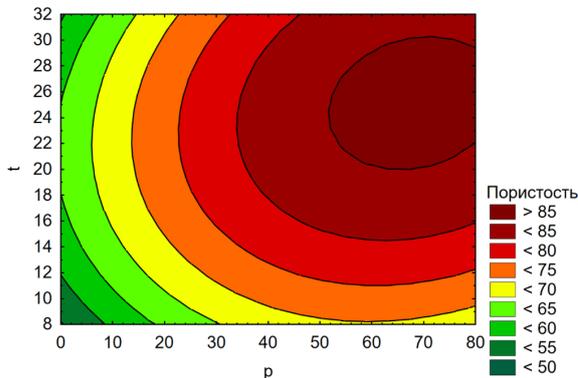


Рис. 3. Карта линий уровня для пористости (Π) в зависимости от давления (p) и времени (t)

ем пористость возрастает. Особенно заметен рост пористости при значениях давления от 30 до 60 кПа, где пористость может достигать 80-82%.

Очень высокое давление (p выше 60 кПа) не даёт значительного прироста пористости, что может свидетельствовать о насыщении или излишнем сжатии материала.

Влияние влажности (B) на пористость проявляется так:

1. Пористость увеличивается с повышением влажности экструдированного овса.
2. При низкой влажности (B около 14-16%) пористость остаётся в пределах 67-70%. Однако при увеличении влажности (B около 22-30%) пористость значительно возрастает, достигая максимум в диапазоне 78-83%.

Это подтверждает гипотезу о том, что влаж-

ность играет ключевую роль в создании пористости при экструзии, и её оптимизация является весьма важной для получения желаемого качества продукта.

Оптимальные условия для достижения высокой пористости находятся в диапазоне давления от 30 до 60 кПа и влажности от 20 до 22%. Это подтверждается наблюдением за тем, как максимальные значения пористости распределяются по этим интервалам.

Избыточное увеличение давления или влажности не приводит к значительному улучшению пористости, что предполагает, что следует соблюдать оптимальные условия для экструзии, чтобы избежать избыточных затрат энергии или сырья.

Зависимость пористости экструдата овса от его влажности и времени выдержки в вакуумной камере термовакуумного экструдера описывается уравнением (4). Графическая интерпретация уравнения представлена на рис. 4

$$\begin{aligned} \Pi = & 28,1311 + 1,7139 \cdot B + \\ & + 3,211 \cdot t - 0,0295 \cdot B^2 - \\ & - 0,0278 \cdot B \cdot t - 0,055 \cdot t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

График показывает, что пористость увеличивается как с увеличением времени выдержки (t), так и влажности (B). При высоких значениях этих параметров пористость может достигать максимальных значений (81,56% и выше), что свидетельствует о том, что эти два фактора влияют на формирование более пористой структуры при экструзии.

Пористость увеличивается с увеличением как времени выдержки (t), так и влажности (B). При высоких значениях этих параметров пористость может достигать максимальных значений (81,56% и выше), что свидетельствует о том, что эти два фактора влияют на формирование более пористой структуры при экструзии.

Влияние времени на пористость, судя по графику, явно выражено: с увеличением времени выдержки от 10 до 30 с, пористость увеличивается, что видно по более темным цветам в верхней части графика. Максимальное значение пористости (81,56%) наблюдается при значениях времени 22-28 с.

Следует отметить, что время выдержки имеет важное значение для формирования пористости, поскольку более длительное воздействие на экструдат способствует лучшему образованию пор.

Влажность (B) экструдированного овса существенно влияет на пористость – при увеличении влажности, особенно в диапазоне от 14 до 22%, пористость возрастает. При более высокой влажности (B > 22%) пористость стабилизируется, что указывает на оптимальный диапазон влажности для достижения наибольшего эффекта.

Пористость значительно возрастает, если влажность увеличивается до 22-24%. После этого значения пористость растёт менее интенсивно, что может свидетельствовать о насыщении материала и

отсутствии значительного эффекта от дальнейшего увеличения влажности.

Комбинированное влияние времени и влажности проявляется следующим образом. Наибольшая пористость достигается при высоких значениях времени (t около 22-28 с) и влажности (B около 20-22%). Эти комбинации обеспечивают оптимальные условия для экструзии овса, создавая материал с максимальной пористостью.

При этом пористость незначительно снижается при времени выдержки ниже 14 с, независимо от уровня влажности, что указывает на то, что для получения высококачественного экструдата требуется определённое время воздействия.

В качестве промежуточного вывода по данной части экспериментальных исследований можно отметить, что для получения максимальной пористости экструдированного овса оптимальными условиями являются следующие:

1. Время выдержки $t \approx 22-28$ с.
2. Влажность $B \approx 20-22$ %.

Зависимость пористости экструдата овса от величины давления в вакуумной камере и времени выдержки в ней экструдата представлена уравнением (5). Его графическая интерпретация приведена на рис. 5.

$$P = 32,8745 + 0,6257 \cdot p + 2,573 \cdot t - 0,0057 \cdot p^2 + 0,0061 \cdot p \cdot t - 0,0595 \cdot t^2 \quad (5)$$

График показывает, что для формирования пористости экструдата овса температура и давление являются ключевыми факторами. При этом повышение давления и температуры положительно влияют на пористость экструдата лишь в определенных интервалах – при слишком высоких значениях этих факторов происходит «перезарядка» структуры, и пористость начинает снижаться. Это объясняется возможными физическими или химическими изменениями структуры овса, что приводит к менее пористой текстуре.

Низкие значения давления (например, $P = 10-20$ кПа) могут не обеспечивать достаточного вакуумного эффекта, что приведет к низкой пористости. В таких условиях процесс экструзии будет недостаточно интенсивным для формирования пористой структуры.

Средние значения давления ($P = 30-50$ кПа) уже обеспечивают более эффективную экструзию, и в этом интервале пористость будет значительно выше. Однако если давление становится слишком высоким, структура овса может стать плотной, а пористость начнёт снижаться.

Таким образом, высокие значения давления ($P > 50$ кПа) могут привести к избыточному сжатию материала, что не способствует формированию оптимальной пористости.

Полученные данные позволяют сделать выводы в части влияния времени выдержки экструдата в вакуумной камере на пористость экструдата овса при термовакуумном воздействии на сырьё.

Низкие значения времени ($t < 10$ с) эффект воздействия пониженного давления на экструдат, что приводит к его недостаточной пористости.

Средние значения времени ($t = 15-20$ с) способствуют получению рационального значения пористости, так как этого периода достаточно для образования пор.

Высокие значения времени ($t > 30$ с) могут привести к переработке материала, что снизит пористость из-за перераспределения частиц и уменьшения образующихся пор.

Таким образом для достижения высокой пористости экструдата из овса рациональными являются следующие интервалы параметров – давление $P \approx 30-50$ кПа; время выдержки $t \approx 15-25$ с. В этих диапазонах пористость будет максимальной, что подтверждается значениями в уравнении и логикой процесса экструзии.

При этом низкие значения давления (например, $p = 10-20$ кПа) могут ограничивать проявления вакуумного эффекта, что приведет к умеренной пористости. В таких условиях процесс экструзии будет недостаточно интенсивным для формирования пористой структуры экструдата овса.

Средние значения давления ($p = 30-50$ кПа) обеспечивают эффективную экструзию, и в этом интервале пористость будет возрастать. Однако последующий рост давления может привести к чрезмерному уплотнению экструдата, и его пористость начнёт снижаться.

Высокие значения давления ($p > 50$ кПа) могут привести к избыточному сжатию материала, что не способствует формированию рациональным значениям пористости.

Низкие значения времени ($t < 10$ с) не позволяют достаточно долго воздействовать на экструдат, что также ведет к недостаточной пористости.

Средние значения времени ($t = 15-20$ с) подходят для достижения оптимальной пористости, так как это время позволяет достаточно воздействовать на материал для образования пор.

Высокие значения времени ($t > 30$ с) могут привести к переработке материала, что снизит пористость из-за перераспределения частиц и уменьшения образующихся пор.

В качестве вывода по этой части анализа можно предположить, что для получения максимальной пористости экструдированного овса рациональными значениями будут следующие интервалы параметров: давление $p \approx 30-50$ кПа и время выдержки $t \approx 15-25$ с.

В этих диапазонах пористость будет максимальной, что подтверждается уравнением (5) и логикой процесса экструзии.

Выводы

В ходе исследования установлено, что снижение давления в вакуумной камере и увеличение времени выдержки экструдата способствуют

повышению его пористости, а также обезвоживанию продукта до оптимального уровня влажности (8-10%). Основными факторами, влияющими на пористость экструдата овса, являются влажность исходного сырья, давление в вакуумной камере и время его воздействия. Проведённый факторный эксперимент и построенная регрессионная модель подтвердили высокую степень объяснённости влияния указанных факторов на результат, при этом время выдержки и влажность оказались наиболее значимыми. Анализ откликов показал, что наи-

большей пористости (83-85%) удаётся достичь при давлениях 30-50 кПа, влажности 14-22% и времени выдержки 18-26 с. При превышении этих значений наблюдается эффект насыщения или даже снижение пористости, что подчёркивает важность соблюдения рациональных параметров. Разработанная модель может эффективно использоваться для управления процессом термовакуумной экструзии с целью повышения качества и энергоэффективности готового продукта.

Литература

- [1] Абрамов, О.В. Научное обеспечение процесса экструзии модельных сред на основе крахмалсодержащего сырья и разработка высокоэффективного оборудования для его реализации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12/Абрамов Олег Васильевич.– Воронеж: 2009. 48 с.
- [2] Зимняков, В. М. Термовакуумная экструзия растительного сырья как вектор развития пищевых технологий / В. М. Зимняков, А. А. Курочкин, О. А. Новикова // Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 03-07 мая 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 455-458.
- [3] Карпов, В.Г. Разработка новых видов крахмалопродуктов экструзионным способом: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.05 / Карпов Владимир Георгиевич. М., 2000. 48 с.
- [4] Курочкин, А.А. Системный подход к разработке экструдера для термовакуумной обработки экструдата /А.А. Курочкин // Инновационная техника и технология. 2014. № 4(1). С. 17-22.
- [5] Научное обеспечение актуального направления в развитии пищевой термопластической экструзии / А.А. Курочкин, П.К. Воронина, В.М. Зимняков, А.Л. Мишанин, В.В. Новиков, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов. Пенза, 2015. 181 с.
- [6] Остриков, А. Н. Экструзионная технология пищевых текстуратов /А.Н. Остриков, М.А. Глухов, А.С. Рудометкин, Е.Г. Окулич-Казарин //Пищевая промышленность. 2007. № 9. С. 18-20.
- [7] Пат. 198439 Российская Федерация, МПК А23Р 30/20. Экструдер с вакуумной камерой /А.А. Курочкин, П.К. Гарькина, Г.В. Шабурова [и др.]. №2020110297; заявл. 10.03.2020; опубл. 09.07.2020. Бюл. № 19. 6 с.
- [8] Теоретическое описание процесса взрывного испарения воды в экструдере с вакуумной камерой /Д.И. Фролов, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, П.К. Воронина //Инновационная техника и технология. 2015. № 1(2). С. 29-34.

References

- [1] Abramov, O.V. Scientific support for the process of extrusion of model media based on starch-containing raw materials and the development of highly efficient equipment for its implementation: author's abstract. dis. ... doctor of technical sciences: 05.18.12 / Abramov Oleg Vasilievich. - Voronezh: 2009. 48 p.
- [2] Zimnyakov, V. M. Thermal vacuum extrusion of plant materials as a vector of development of food technologies / V. M. Zimnyakov, A. A. Kurochkin, O. A. Novikova // Regional problems of sustainable development of the agro-industrial complex in the context of digital transformation: Collection of articles of the International scientific and practical conference, Penza, May 03-07, 2024. - Penza: Penza State Agrarian University, 2024. P. 455-458.
- [3] Karpov, V.G. Development of new types of starch products by extrusion method: author's abstract. dis. ... doctor of technical sciences: 05.18.05 / Karpov Vladimir Georgievich. Moscow, 2000. 48 p.
- [4] Kurochkin, A.A. Systems approach to development of an extruder for thermal vacuum processing of extrudate / A.A. Kurochkin // Innovative equipment and technology. 2014. No. 4(1). P. 17-22.
- [5] Scientific support of the current direction in the development of food thermoplastic extrusion / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, V.M. Zimnyakov, A.L. Mishanin, V.V. Novikov, G.V. Shaburova, D.I. Frolov. Penza, 2015. 181 p.
- [6] Ostrikov, A. N. Extrusion technology of food textured products /A. N. Ostrikov, M. A. Glukhov, A. S. Rudometkin, E. G. Okulich-Kazarin // Food industry. 2007. No. 9. P. 18-20.
- [7] Patent. 198439 Russian Federation, IPC A23P 30/20. Extruder with a vacuum chamber /A. A. Kurochkin, P. K. Garkina, G. V. Shaburova [et al.]. No. 2020110297; declared 10.03.2020; published 09.07.2020. Bulletin No. 19. 6 p.
- [8] Theoretical description of the process of explosive evaporation of water in an extruder with a vacuum chamber /D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, G.V. Shaburova, P.K. Voronina //Innovative equipment and technology. 2015. No. 1(2). pp. 29-34.
- [9] Thermoplastic extrusion: scientific fundamentals,

- [9] Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование /Под ред. А.Н. Богатырева, В.П. Юрьева.– М.: Ступень, 1994. 200 с.
- [10] Патент № 2579488 С1 Российская Федерация, МПК А21D 8/02. Способ производства хлебобулочных изделий : № 2014146596/13 : заявл. 19.11.2014 : опубл. 10.04.2016 / Г. В. Шабурова, П. К. Воронина, А. А. Курочкин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный технологический университет». – EDN UOANLF.
- [11] Потапов, М. А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета / М. А. Потапов, Д. И. Фролов, А. А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 4. – С. 42-48. – EDN AFMRPP.
- [12] Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A. A. Kurochkin, D. I. Frolov, V. M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 26–29 февраля 2020 года. – Voronezh, 2021. – P. 072018. – DOI 10.1088/1755-1315/640/7/072018. – EDN CHLIKW.
- technology, equipment / Ed. A.N. Bogatyreva, V.P. Yuryeva.– М.: Stepen, 1994. 200 p.
- [10] Patent No. 2579488 C1 Russian Federation, IPC A21D 8/02. Method for the production of bakery products: No. 2014146596/13: application. 11/19/2014: publ. 04/10/2016 / G. V. Shaburova, P. K. Voronina, A. A. Kurochkin [etc.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Penza State Technological University». – EDN UOANLF.
- [11] Potapov, M. A. Optimization of the Number of Holes in the Die of a Single-Screw Extruder for Processing Bird Manure / M. A. Potapov, D. I. Frolov, A. A. Kurochkin // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. – 2020. – No. 4. – P. 42-48. – EDN AFMRPP.
- [12] Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A. A. Kurochkin, D. I. Frolov, V. M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, February 26–29, 2020. – Voronezh, 2021. – P. 072018. – DOI 10.1088/1755-1315/640/7/072018. – EDN CHLIKW.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Курочкин Анатолий Алексеевич доктор технических наук профессор кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(927) 382-85-03 E-mail: anatolii_kuro@mail.ru</p>	<p>Kurochkin Anatoly Alekseevich D.Sc. in Technical Sciences professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(927) 382-85-03 E-mail: anatolii_kuro@mail.ru</p>
<p>Новикова Ольга Анатольевна аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 914-73-00 E-mail: ms.varlos@mail.ru</p>	<p>Novikova Olga Anatolievna upostgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 914-73-00 E-mail: ms.varlos@mail.ru</p>
<p>Соколова Наталья Николаевна исследователь ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)» 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 11 E-mail: n.shmatkova2014@list.ru</p>	<p>Sokolova Natalia Nikolaevna researcher Russian Biotechnological University E-mail: n.shmatkova2014@list.ru</p>