

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КУКУРУЗНЫХ ЭКСТРУДАТОВ

Фролов Д.И.

Целью данной работы было определить влияние скорости вращения шнека и уровня влажности сырья на эффективность и энергопотребление процесса экструзии. Измерение эффективности процесса экструзии (Q) проводилось путем определения массы экструдатов, а потребление энергии определялось с использованием удельной механической энергии. На основании результатов исследований выяснилось, что фактором, который существенно влияет на измеренные значения, была скорость вращения шнека. Наряду с увеличением этого параметра в процессе обработки кукурузных зерен повышалась эффективность потребления энергии и эффективности процесса экструзии. Эффективность процесса экструзии зависела также от уровня влажности сырья. При более низкой влажности сырья эффективность снижалась вместе с увеличением скорости вращения шнека, а при уровне влажности выше 18% соответственно увеличивалась.

Ключевые слова: *экструдирование, кукурузные зерна, удельная механическая энергия, эффективность процесса, энергоэффективность.*

Введение

В условиях современного образа жизни, который характеризуется легким и быстрым потреблением пищи, которая не требует долгого времени подготовки, каши и смеси для детей являются самыми популярными продуктами, которые все чаще ищут современные родители.

Процесс экструзионной варки - обработка порошкообразного материала под высоким давлением и высокой температурой. Экструзионное приготовление является одним из нескольких методов, используемых для производства детского питания. Этот особый процесс имеет много преимуществ, в том числе дезактивацию некоторых антипитательных факторов, таких как ингибиторы трипсина и протеазы, в результате чего продукты демонстрируют большую усвояемость. Из-за приложенного давления и термической обработки экструдированные продукты не нужно готовить позже [1]. Полностью автоматизированная производственная линия позволяет обеспечить высокие гигиенические и санитарные нормы, что имеет большое значение при производстве этого вида продукции. Например, детское питание в виде порошкообразных продуктов, полученных из кукурузы, риса, пшеницы, овса или гречневой муки. Кукуруза является самым популярным сырьем, используемым в процессе экструзии. Эти виды продуктов часто обогащаются сушеными фруктами, молоком с начинкой, витаминами и минеральными компонентами, чтобы обеспечить сбалансированное и питательное детское питание [2, 3].

Целью данной работы было оценить влияние скорости вращения шнека и уровня влажности сырого материала на выбранные параметры эксплуа-

тации процесса экструзионной варки быстрорастворимых кукурузных смесей.

Объем работ по данной статье включал производство экструдатов кукурузы и определение влияния выбранных параметров процесса на потребление энергии и эффективность процесса приготовления быстрорастворимых кукурузных смесей.

Объекты и методы исследований

Для исследования был использован материал в виде коммерческого кукурузного зерна с влажностью 11%. Кукурузное зерно увлажняли до уровня влажности (W): 12, 14, 16, 18, 20, 22% и обрабатывали обработкой экструзией путем одношнекового экструдера с соотношением $L: D = 12: 1$. Был применен винт со степенью сжатия 3: 1 и один формовочный штамп с диаметром отверстия 3 мм. Экструзионная варка проводилась при температурах 120, 130, 135 °C в отдельных секциях ствола при переменном вращении (n), которые составляли 60, 80, 100, 120 (об/мин).

Влажность смесей сырья определяли методом сушки с использованием лабораторной сушилки [4, 5]. Измерения эффективности процесса (Q) проводились путем определения массы экструдатов в течение заданного времени для всех образцов. Измерения проводились в 5 повторях, в качестве конечного результата принималось среднее из измерений. Эффективность (Q , $\text{кг}\cdot\text{ч}^{-1}$) выражалась по формуле:

$$Q = \frac{m}{t} \quad (1)$$

где Q – эффективность процесса;

m - масса экструдатов, полученных во время измерения, кг;

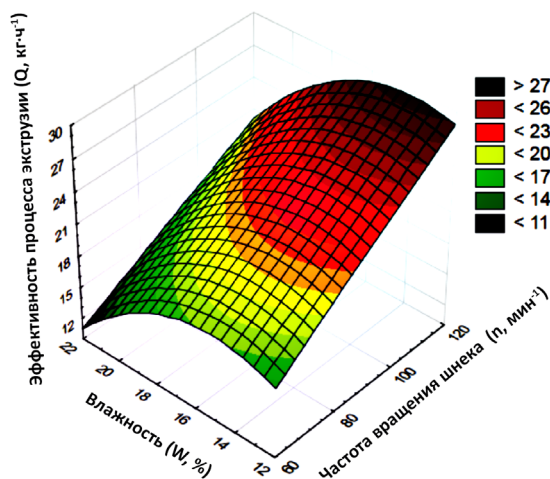


Рис. 1. Эффективность процесса экструзионной варки растворимой кукурузной смеси по отношению к скорости вращения шнека и уровню влажности сырья

t – время, ч.

Потребляемая мощность была записана с использованием стандартного ваттметра, подключенного к приводу экструдера. Принимая во внимание характеристику экструдера, определяли нагрузку на двигатель и эффективность процесса, а полученные значения рассчитывали на удельную механическую энергию (SME, кВт·ч·кг⁻¹) [6]:

$$SME = \frac{n \cdot P \cdot O}{n_M \cdot 100 \cdot Q} \quad (2)$$

где SME – удельная механическая энергия, кВт·ч·кг⁻¹;

n – частота вращения шнека, мин⁻¹;

n_M – максимальная частота вращения шнека, мин⁻¹;

P – электрическая мощность, кВт;

O – нагрузка на двигатель, %;

Q – эффективность процесса экструзии, кг·ч⁻¹.

Проведен статистический анализ полученных результатов с использованием программы Statistica 10 [7].

Результаты и их обсуждение

Эффективность процесса экструзионной варочной обработки кукурузных зерен варьировалась от 11,4 до 32,16 (кг·ч⁻¹) по отношению к применяемым параметрам. Наивысшая эффективность процесса наблюдалась при обработке смеси с влажностью 14% при вращении винтов 120 (об/мин). Наименьшие значения эффективности получились при обработке на самом высоком уровне влажности сырья и скорости вращения шнека 60 (об/мин).

Испытания показали, что скорость вращения шнека оказывает значительное влияние на эффективность процесса. Значение исследуемого параметра увеличивалось вместе с увеличением скорости вращения шнека экструдера. В ходе исследования

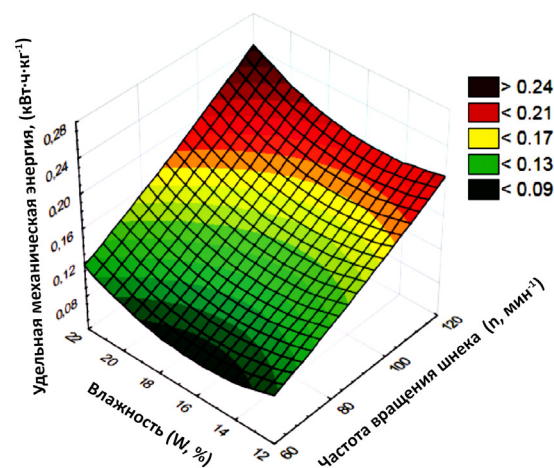


Рис. 2. Энергопотребление процесса экструзионной варки растворимой кукурузной смеси по отношению к скорости вращения шнека и уровню влажности сырья

выяснилось, что эффективность процесса экструзионной варки изначально увеличивалась с увеличением уровня влажности до 16%, а затем уменьшалась с использованием сырья с более высоким уровнем влажности (рис. 1). Аналогичное соотношение было получено другими исследователями при экструзии кукурузно-гороховых смесей, где увеличение уровня увлажнения исходных смесей приводило к уменьшению производительности процесса экструзии.

В ходе исследования выяснилось, что значение удельной механической энергии, определяемое как электрическая энергия, необходимая для получения 1 кг продукта, находилась на уровне 0,073-0,247 кВт·ч·кг⁻¹ в отношении применяемых параметров процесса. Наименьшее потребление энергии определялось во время экструзионного приготовления кукурузных зерен с уровнем влажности сырого материала, равным 14 и 16% при скорости вращения шнека 60 (об/мин). Наибольшее потребление энергии определялось при обработке сырого материала, смоченного до 20 и 22% влажности, и на уровне скорости вращения шнека экструдера 120 (об/мин).

Исследование показало значительное влияние скорости вращения шнека экструдера на значение удельной механической энергии. Увеличение числа оборотов привело к получению более высоких значений удельной механической энергии во время процесса экструзии кукурузных гранул. Аналогичное соотношение наблюдалось другими исследователями во время переработки пшеничной муки одношнековым экструдером.

Кроме того, наблюдалось влияние влажности сырья на потребление энергии во время обработки. При более низкой начальной влажности сырьевой смеси, т.е. 12% и 16% вместе с увеличением скорости вращения шнека, значения тестируемого параметра уменьшились. С другой стороны, из зерна с влажностью 18% наблюдалось небольшое увеличение удельной механической энергии (рис. 2).

Таблица 1 – Анализ дисперсии эффективности процесса экструзии-варки

Источник изменчивости	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-Значение	Уровень значимости
Влажность (W)	5	806,13	161,22	2450,22	<0,0001
Частота вращения шнека (n)	3	1142,5	380,87	5788,21	<0,0001
Влажность · Частота вращения шнека ($W \cdot n$)	15	39,71	2,647	40,24	<0,0001
Ошибка	48	3,158	0,066		

Таблица 2 – Анализ дисперсии удельной механической энергии процесса экструзии-варки

Источник изменчивости	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-Значение	Уровень значимости
Влажность (W)	5	0,020	0,004	1171,6	<0,0001
Частота вращения шнека (n)	3	0,140	0,047	13723,1	<0,0001
Влажность · Частота вращения шнека ($W \cdot n$)	15	0,003	0,000	53,3	<0,0001
Ошибка	48	0,001	0		

Таблица 3 – Регрессионные уравнения, описывающие изменения эффективности процесса и потребления энергии по отношению к содержанию влаги и скорости вращения шнека

Критерий оценивания	Влажность (%)	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации (R^2)
эффективность процесса экструзии	12	$Q=0,841 n^2 - 0,073 n + 15$	0,998
	14	$Q = 0,242 n^2 + 2,353 n + 18,67$	0,999
	16	$Q = -0,122 n^2 + 4,535 n + 13,91$	0,997
	18	$Q = -0,045 n^2 + 3,913 n + 11,09$	0,991
	20	$Q = -0,242 n^2 + 4,127 n + 9,23$	0,986
	22	$Q = -0,843 n^2 + 7,323 n + 4,93$	0,993
удельная механическая энергия	12	$SME = - 0,0046 n^2 + 0,0602 n + 0,0414$	0,998
	14	$SME = 0,0012 n^2 + 0,0322 n + 0,0386$	0,999
	16	$SME = 0,0006 n^2 + 0,0337 n + 0,0442$	0,998
	18	$SME = 0,0007 n^2 + 0,0324 n + 0,0597$	0,99
	20	$SME = 0,0043 n^2 + 0,0246 n + 0,0757$	0,995
	22	$SME = 0,0091 n^2 - 0,0027 n + 0,1104$	0,992

Полученные результаты измерений были подвергнуты двухстороннему дисперсионному анализу, проведенному с использованием программного обеспечения Statistica. Первым фактором была влажность сырьевой смеси (W), а вторым - скорость вращения шнека (n). Анализ дисперсии проводился для каждого фактора отдельно и для их взаимодействия. Полученные результаты были представлены в таблицах 1 и 2. Кроме того, были оценены уравнения регрессии и коэффициенты корреляции (таблица 3)

Результаты анализа дисперсии, приведенного в таблицах 1 и 2, свидетельствуют о том, что значительное влияние различных условий процесса

экструзионной варки на результаты эффективности процесса и потребления энергии при производстве быстрорастворимой кукурузной смеси при предполагаемом доверительном интервале 95%. Было отмечено, что как применяемый уровень влажности сырья, так и изменяемая скорость вращения шнека влияют на эффективность и энергопотребление процесса экструзии.

Высокие значения коэффициентов корреляции (R^2) оказывают значительное влияние на скорость вращения шнека и уровень влажности исходной смеси как по эффективности, так и по энергопотреблению процесса экструзионной варки (таблица 3).

Выводы

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Увеличение скорости вращения шнека повлияло как на эффективность, так и на потребление энергии процесса экструзионной варки быстрорастворимых кукурузных смесей. Увеличение скорости вращения шнека привело к повышению эффективности процесса экструзии и удельной механической энергии.
2. Уровень влажности сырья повлиял на значение исследуемых параметров. Наблюдалось, что

наряду с увеличением влажности сырья с 12% до 16% было отмечено снижение удельной механической энергии и повышение эффективности процесса. С другой стороны, повышение влажности выше 18% увеличило потребление энергии и снизило эффективность процесса.

3. Более высокие значения параметра F при анализе дисперсии указывают на большее влияние скорости вращения шнека на эффективность процесса экструзионной варки. Аналогичные наблюдения были сделаны в анализе результатов удельной механической энергии.

Список литературы

- [1] 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.
- [2] Курочкин А.А., Фролов Д.И., Воронина П.К. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4 (32). С. 172–177.
- [3] 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 (02). С. 29–34.
- [4] Курочкин А.А., Фролов Д.И. Поликомпонентный экструдат на основе зерна пшеницы и семян рапсовидной пшеницы // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4. С. 76–81.
- [5] Коновалов В.В., Курочкин А.А., Фролов Д.И. Методология проектирования смесителей-увлажнителей сыпучих пищевых продуктов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2014. № 6 (22). С. 189–196.
- [6] Combrzyński, M., Wójtowicz, A., Klimek, M., Mościcki, L., Oniszczyk, T., Juško, S. (2015). Specific mechanical energy consumption of extrusion-cooking of wheat foamed packaging materials. *Agricultural Engineering*, 1(153), 25-34.
- [7] Анализ процесса движения воздуха внутри кожуха ботвоудаляющего рабочего органа с обоснованием оптимального угла наклона ножей / Д.И. Фролов, А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.Е. Каширин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2015. № 4 (28). С. 67–72.

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON ENERGY EFFICIENCY AT THE PRODUCTION OF CORN EXTRUDES

Frolov D.I.

The purpose of this work was to determine the effect of screw speed and moisture level on the efficiency and energy consumption of the extrusion process. The extrusion process (Q) was measured by determining the mass of the extrudates, and the energy consumption was determined using specific mechanical energy. Based on the results of the research, it was found that the factor that significantly affects the measured values was the screw rotation speed. Along with the increase in this parameter, the efficiency of energy consumption and the efficiency of the extrusion process increased during the processing of maize grains. The efficiency of the extrusion process also depended on the moisture content of the raw materials. With a lower raw material moisture, the efficiency decreased with increasing screw speed, and at a moisture level above 18%, respectively, increased.

Keywords: *extruding, corn grains, specific mechanical energy, process efficiency, energy efficiency.*

References

- [1] Ekstrudaty iz rastitel'nogo syr'ya s povyshennym sodержaniem lipidov i pishchevykh volokon / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv.* 2016. № 3 (42). Pp. 104–111.
- [2] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Voronina P.K. Opredelenie osnovnykh parametrov vakuumnoi kamery modernizirovannogo ekstrudera // *Vestnik Ul'yanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii.* 2015. № 4 (32). Pp. 172–177.
- [3] Teoreticheskoe opisanie protsessa vzryvnogo ispareniya vody v ekstrudere s vakuumnoi kameroy / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, P.K. Voronina // *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya.* 2015. № 1 (02). Pp. 29–34.
- [4] Kurochkin A.A., Frolov D.I. Polikomponentnyi ekstrudat na osnove zerna pshenitsy i semyan rastropshi pyatnistoi // *Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii.* 2015. № 4. Pp. 76–81.
- [5] Konovalov V.V., Kurochkin A.A., Frolov D.I. Metodologiya proektirovaniya smesitelei-uvlazhnitelei sypuchikh pishchevykh produktov // *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus.* 2014. № 6 (22). Pp. 189–196.
- [6] Combrzyński, M., Wójtowicz, A., Klimek, M., Mościcki, L., Oniszczyk, T., Juško, S. (2015). Specific mechanical energy consumption of extrusion-cooking of wheat foamed packaging materials. *Agricultural Engineering*, 1(153), 25-34.
- [7] Analiz protsessa dvizheniya vozdukha vnutri kozhukha botvoudalyayushchego rabocheho organa s obosnovaniem optimal'nogo ugla naklona nozhei / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.E. Kashirin // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P.A. Kostycheva.* 2015. № 4 (28). Pp. 67–72.