

Влияние параметров экструзии на физические свойства экструдатов нута

Фролов Д.И., Кручинина Н.Э.

Аннотация. В этом исследовании оценивали влияние экструзионной обработки на удельную механическую энергию и физические свойства экструдатов нута (коэффициент расширения, насыпная плотность и твердость). Обработка экспериментальных данных была проведена с использованием методологии поверхности отклика при следующих параметрах: температура на выходе из фильеры (120–150 °С), влажность (20–24 %) и скорость вращения шнека (260–340 об/мин). Факторами, которые больше всего повлияли на характеристики продукта, являлись: температура на выходе из фильеры и содержание влаги в сырье, а также взаимодействие между ними. Была обнаружена значительная корреляция между твердостью и насыпной плотностью (положительная), твердостью и коэффициентом расширения (отрицательная), а также насыпной плотностью и коэффициентом расширения (отрицательная). Желаемые характеристики (высокое расширение, низкая насыпная плотность и твердость) для нута были получены при высокой температуре на выходе из фильеры, относительно высокой влажности и высокой скорости вращения шнека.

Ключевые слова: экструзия, нут, мука, экструдат.

Для цитирования: Фролов Д.И., Кручинина Н.Э. Влияние параметров экструзии на физические свойства экструдатов нута // Инновационная техника и технология. 2020. № 3 (24). С. 17–22.

Effect of extrusion parameters on the physical properties of chickpea extrudates

Frolov D.I., Kruchinina N.E.

Abstract. This study evaluated the effect of extrusion processing on the specific mechanical energy and physical properties of chickpea extrudates (expansion coefficient, bulk density and hardness). The experimental data were processed using the response surface methodology with the following parameters: temperature at the exit from the die (120–150 °C), humidity (20–24 %), and screw rotation speed (260–340 rpm). The factors that most influenced product performance were die outlet temperature and feed moisture content, and the interactions between them. A significant correlation was found between hardness and bulk density (positive), hardness and expansion coefficient (negative), and bulk density and expansion coefficient (negative). The desired characteristics (high expansion, low bulk density and hardness) for the chickpea were obtained at a high die outlet temperature, relatively high humidity and a high screw speed.

Keywords: extrusion, chickpeas, flour, extrudate.

For citation: Frolov D.I., Kruchinina N.E. Effect of extrusion parameters on the physical properties of chickpea extrudates. Innovative Machinery and Technology. 2020. No.3 (24). pp. 17–22. (In Russ.).

Введение

В настоящее время актуальной задачей для пищевой промышленности является разработка питательных и хорошо сбалансированных пищевых продуктов, адаптированных к сегментации рынка и использованием альтернативных технологий и ингредиентов. Экструзия - это кратковременный процесс, при котором пищевой материал готовится

ся с помощью температуры, влажности, механического сдвига и давления, при проталкивании через фильеру экструдера. Когда материал выходит из фильеры, сброс давления заставляет его раздуваться в различных формах в зависимости от геометрии фильеры. Реакции, которые происходят во время экструзионной варки, зависят от ряда переменных, связанных как с параметрами машины, так и с используемым сырьем.

Таблица 1 – Исходные данные для удельной механической энергии (УМЭ), коэффициента расширения (КР), насыпной плотности (В) и твердости экструдатов нута

Т, °С	W, %	n, об/мин	Нут			
			УМЭ, кДж/кг	КР	В, г/см ³	Твердость, Н
120	20	260	454	2,3	0,424	613
120	24	340	432	2,5	0,442	473
135	22	300	332	2,8	0,336	412
120	20	340	567	2,5	0,372	458
110	22	300	443	2,1	0,468	550
135	25,4	300	317	3,1	0,34	548
150	20	340	341	1,9	0,258	634
135	22	300	369	3	0,308	454
135	18,6	300	460	3,3	0,279	460
150	24	260	432	3,4	0,16	429
135	22	300	367	2,9	0,286	544
135	22	367	443	2,9	0,205	399
135	22	300	332	2,9	0,278	416
135	22	300	332	3	0,275	441
150	20	260	454	2,2	0,278	519
150	24	340	216	4,1	0,106	295
120	24	260	432	2,4	0,444	508
160	22	300	221	3,5	0,103	276
135	22	233	443	2,4	0,349	469
135	22	300	332	2,7	0,291	416

Хотя зерновые культуры широко используются и предпочтительны для производства экструдированных пищевых продуктов, из-за их хорошего расширения они, как правило, содержат мало белка и других питательных веществ [1]. Зернобобовые, в том числе нут и фасоль, являются не только отличным источником белка, но и сложных углеводов, витаминов и минералов [2]. Нут (*Cicer arietinum* L.) богат белком (24,4 %), пищевыми волокнами (9,0 %) и сложными углеводами (60,0 %). По сравнению с пшеничной мукой, мука из нута содержит большее количество как макро- (калий, кальций и магний), так и микроэлементов (медь, железо и цинк). Среднее содержание липидов в нуте колеблется от 5,3 до 7,3 % и характеризуется высоким содержанием линолевой кислоты (54,7-56,2 % масла), олеиновой кислоты (21,6-22,2 % масла) и линоленовой кислоты (0,5-0,9 % масла). Что касается белков нута, главными фракциями являются глобулины и альбумины, но также могут быть обнаружены небольшие количества глютенинов и проламинов [3, 4]. Из-за высокого содержания лизина зернобобовая мука может использоваться в различных пропорциях в смеси, чтобы дополнить аминокислотный профиль злаков с низким содержанием лизина.

Основная цель этого исследования состояла в том, чтобы изучить влияние переменных экструзионной обработки, таких как температура на вы-

ходе из фильеры, влажность и скорость шнека, на удельную механическую энергию (УМЭ) и физические свойства (коэффициент расширения, объемная плотность и твердость) экструдатов из нута.

Методология поверхности отклика использовалась для изучения эффектов уравнения регрессии. Для соответствия экспериментальным данным использовались модели полиномиальной регрессии второго порядка [5].

Объекты и методы исследования

При выполнении работы были использованы общепринятые стандартные методы исследований.

Мука из нута была закуплена в продуктовой сети. Состав нутовой муки был следующим (на влажной основе): влажность 10,20 %, золы 2,88 %, белка 25,0 %, жиры 5,31 %, крахмала 38,4 %, резистентного крахмала 0,75 %.

Все эксперименты по экструзии проводили с использованием одношнекового лабораторного экструдера ЭК-40 (диаметр шнека 40 мм) с использованием фильеры диаметром 3 мм. Влагосодержание муки определяли перед экструзией, а затем регулировали общую влажность экструдированной массы путем добавления воды в экструдер в соответствии с экспериментальной схемой. Перед взятием образца составы и условия экструзии оставляли для стабилизации в течение 10 мин. На основании предварительных испытаний экструдаты сушили в течение 5 минут при 105 °С в сушилке.

Программа Statistica 10 была использована для составления плана эксперимента, проведения статистического анализа и использовалась для разработки, оценки эффектов и получения поверхностей отклика.

Центральное композиционное планирование эксперимента использовалось для оценки влияния переменных процесса экструзии на удельную механическую энергию и физические свойства экструдатов. Были добавлены дополнительные центральные точки, чтобы лучше измерить присущую изменчивость. Независимыми переменными были: температура на выходе из фильеры (Т) (120-150 °С), содержание влаги (W) (20-24 % в сыром виде) и скорость шнека (n) (260-340 об/мин). Исходные данные представлены в таблице 1.

Скорость подачи поддерживалась постоянной на уровне 14 кг в час для всех экспериментов, как определено в предварительных испытаниях экструзии. Модели полиномиальной регрессии второго порядка были использованы для соответствия экспериментальным данным (уравнение 1).

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

где у- данные отклика, $x_1 - x_3$ – экспериментальные

факторы, b_0 – константа, $b_1 - b_3$ – линейные коэффициенты, b_{11}, b_{22}, b_{33} – квадратичные коэффициенты, b_{12}, b_{13}, b_{23} – коэффициенты взаимодействия.

Значения удельной механической энергии (УМЭ), были записаны после достижения устойчивого состояния.

Коэффициент расширения (КР) определяли как отношение между диаметром экструдатов (измеренным с помощью цифрового штангенциркуля) и диаметром отверстия фильеры экструдера (0,3 мм). Выбиралось среднее значение шести измерений.

Объемная плотность (В) определялась путем взвешивания количества экструдатов, необходимых для заполнения контейнера емкостью 500 мл, и выражалась в $г/см^3$. Экструдаты добавляли в контейнер случайным образом, и контейнер несколько раз встряхивали во время заполнения. Когда экструдаты были более объемными, вместо них использовали контейнер объемом 1 л. Выбиралось среднее значение двух измерений для каждого условия обработки.

Твердость определяли путем измерения максимального усилия, необходимого для разрушения экструдатов. Выбиралось среднее значение не менее трех измерений.

Таблица 2 – Коэффициенты регрессии и оценки параметров модели удельной механической энергии (УМЭ), коэффициента расширения (КР), насыпной плотности (В) и твердости экструдатов нута

	УМЭ, кДж/кг	КР	В, г/см ³	Твердость, Н
Св.член	492,718	42,046	-1,899	614,608
T, °C	21,18	-0,195	0,026	21,220
T, °C ²	0,006	-0,000	0	-0,015
W, %	-150,631	-2,886	0,094	-70,409
W, % ²	5,146	0,016	0,002	7,004
n, об/мин	4,168	0,018	0,000	-2,531
n, об/мин ²	0,025	-0,000	0	0,003
T, °C*W, %	0,042	0,014	-0,002	-1,413
T, °C*n, об/мин	-0,092	0,000	0	0,036
W, %*n, об/мин	-0,337	0,001	0,000	-0,202

Таблица 3 – Качественные показатели моделей

	Множест. R	Множест. R2	F	p
УМЭ, кДж/кг	0,975	0,952	21,845	0,000
КР	0,870	0,756	3,448	0,033
В, г/см ³	0,968	0,938	16,716	0,000
Твердость, Н	0,718	0,516	1,183	0,396

Результаты и их обсуждение

Во время процесса экструзии сырье подвергается многим изменениям, таким как клейстеризация и декстринизация крахмала, разворачивание и денатурация белка, а также комплексобразование между липидами и амилозой. Степень этих молекулярных превращений сильно зависит от подводимой механической энергии. На удельную механическую энергию во время экструзии муки из нута значительно ($p < 0,01$) влияли температура на выходе из фильеры и содержание влаги. Линейный эффект скорости вращения шнека был незначительным, но квадратичный эффект и взаимодействие с температурой на выходе из фильеры и содержанием влаги были значительными ($p < 0,05$). Температура на выходе из фильеры для муки из нута больше всего повлияла на удельную механическую энергию. Поверхности отклика (подогнанные) (рис.1) показали, что при низких температурах на выходе из фильеры увеличение содержания влаги в муке из нута приводит к более низким значениям удельной механической энергии. Анализируя поверхности отклика, увеличение температуры и влажности на выходе из фильеры приведет к более низким значениям удельной механической энергии для нутовой муки. Коэффициенты регрессии и соответствие моделей (p -значения) представлены в таблице 2.

Известно, что взаимодействие воды и температуры может существенно влиять на конверсию крахмала. В среде с избытком воды все кристаллиты крахмала будут разделены набуханием, и произойдет полная клейстеризация крахмала. Когда вода ограничена, что является условием во время экструзии, кристаллические области будут плавиться при довольно высоких температурах. В этом порядке вода действует как смазка и смягчает тесто, тем самым уменьшая вязкость и удельную механическую энергию. С повышением температуры теста происходит желатинизация и плавление крахмала, и из-за сдвига эти уже клейстеризованные и расплавленные гранулы крахмала далее механически разбиваются на более мелкие фрагменты, тем самым снижая вязкость расплава. Показано, что степень фрагментации крахмала связана как с механической, так и с тепловой энергией и, как сообщается, проявляется в виде ограниченного разветвления в амилопектине и случайного расщепления цепи в амилозе.

Температура на выходе из фильеры и содержание влаги значительно ($p < 0,05$) влияли на коэффициент расширения (КР) экструдатов нута (таблица 2). Член взаимодействия между температурой на выходе из фильеры и содержанием влаги также был значительным ($p < 0,05$). Значения КР находились в диапазоне от 1,9 до 4,1. Согласно поверхности отклика (рис. 2) при низком содержании влаги влияние температуры было менее выраженным, тогда как увеличение как влажности, так и температуры привело бы к более высокому расширению экструзии.

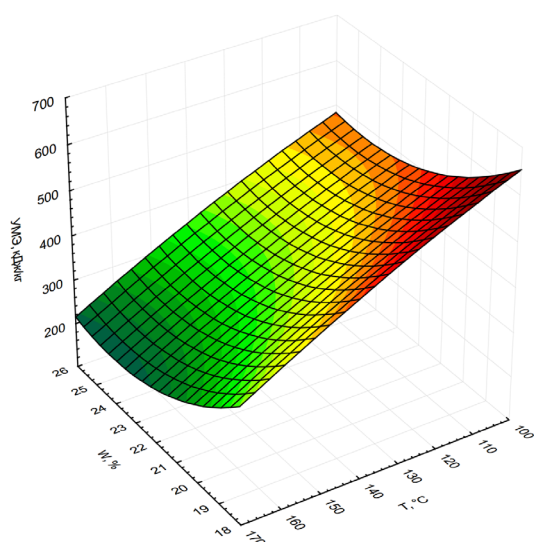


Рис. 1. Поверхность отклика для удельной механической энергии в зависимости от температуры на выходе из фильеры и содержания влаги для муки из нута

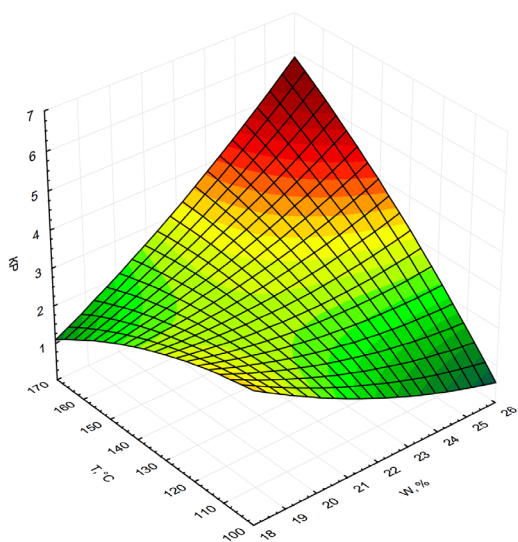


Рис. 2. Поверхность отклика степени расширения для экструдатов нута в зависимости от температуры и влажности на выходе из фильеры

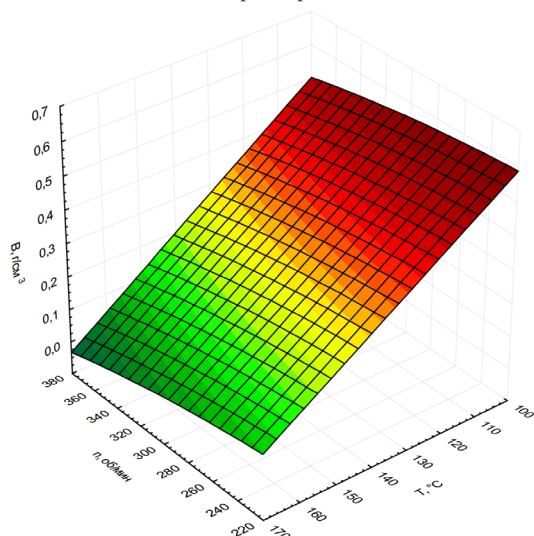


Рис. 3. Поверхность отклика насыпной плотности для экструдатов нута в зависимости от температуры на выходе из фильеры и скорости шнека

датов. Другими словами, взаимодействие между температурой и влажностью было наиболее важным фактором для расширения продукта.

Температура на выходе из фильеры и скорость вращения шнека значительно повлияли на объемную плотность экструдатов нута, так как только линейные эффекты были значимыми ($p < 0,05$) (таблица 2). Значения варьировались от 0,103 до 0,468 г/см³. Продукты с низкой насыпной плотностью получали при высокой температуре и средней или высокой скорости вращения шнека (рис. 3). Влияние взаимодействия между температурой на выходе из фильеры и содержанием влаги на насыпную плотность было очень значительным ($p < 0,01$).

В этом эксперименте ни один из факторов существенно не влиял на твердость экструдатов нута, однако температура на выходе из фильеры была незначительной ($p < 0,1$). Твердость экструдатов находилась в диапазоне от 276 до 634 Н. Низкие значения твердости были получены при высокой температуре на выходе из фильеры, высокой влажности и высокой скорости вращения шнека. Как правило, материалы с низким содержанием белка (с высоким содержанием крахмала) имеют тенденцию образовывать воздушные продукты с низкой плотностью, тогда как материалы с высоким содержанием белка (с низким содержанием крахмала), как правило, образуют более плотные текстурированные продукты. В настоящем исследовании мука из нута имела содержание крахмала 38,4 % и содержание белка 25,0. Для вспученных злаков рекомендуется концентрация крахмала 60-70 %. Кроме того, крахмалы не расширяются одинаково из-за разницы в их структуре. Белки могут оказывать положительное или отрицательное влияние на расширение из-за их способности изменять распределение воды в матрице и в зависимости от типа и концентрации белка. Более высокое содержание жира также может быть причиной меньшего вспучивания и низкого качества экструдатов нута. Благодаря смазывающему эффекту жира и предотвращению острого механического разрушения молекул крахмала под действием приложенных сил сдвига степень превращения крахмала снижается, что отрицательно сказывается на расширении.

Значительная ($p < 0,05$) корреляция была обнаружена между твердостью и насыпной плотностью (положительная), твердостью и коэффициентом расширения (отрицательная), а также насыпной плотностью и коэффициентом расширения (отрицательная) для экструдатов нута. Эти результаты согласуются с другими исследованиями [6-9].

Выводы

В этом исследовании с использованием центрального композиционного планирования было оценено влияние температуры на выходе из фильеры, содержания влаги и скорости шнека на удельную механическую энергию и физические свойства

(коэффициент расширения, объемная плотность и твердость) экструдатов нута. Для муки из нута температура на выходе из фильеры больше всего повлияла на удельную механическую энергию. Повышение температуры на выходе из фильеры и содержания влаги привело к снижению значений удельной механической энергии. Желательные ха-

рактеристики (высокое расширение, низкая насыпная плотность и низкие значения твердости) для нута были получены при высокой температуре на выходе из фильеры, относительно высокой влажности и высокой скорости вращения шнека.

Список литературы

- [1] Meng X, Threinen D, Hansen M, Driedger D. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack. *Food Res. Int.* 43: 650-658 (2010).
- [2] Wang N, Hatcher DW, Tyler RT, Toews R, Gawalko E. Effect of cooking on the composition of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and chickpeas (*Cicer arietinum* L.). *Food Res. Int.* 43:589-594 (2010).
- [3] Rachwa-Rosiak D, Nebesny E, Budryn G. Chickpeas-composition, nutritional value, health benefits, application to bread and snacks: A review. *Crit. Rev. Food Sci.* 55: 1137-1145 (2015).
- [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] Потапов М.А., Фролов Д.И., Курочкин А.А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии.* 2020. Т. 5. № 4. С. 42–48.
- [6] 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.
- [7] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д.И. Фролов [и др.] // *Нива Поволжья.* 2019. № 2 (51). С. 134–143.
- [8] Теоретическое обоснование термовакуумного эффекта в рабочем процессе модернизированного экструдера / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии.* 2015. № 3. С. 15–20.
- [9] Рациональные технологические параметры при производстве поликомпонентного композита на основе семян льна / В.М. Зимняков, О.Н. Кухарев, А.А. Курочкин, Д.И. Фролов // *Нива Поволжья.* 2017. № 4 (45). С. 157–163.

References

- [1] Meng X, Threinen D, Hansen M, Driedger D. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack. *Food Res. Int.* 43: 650-658 (2010).
- [2] Wang N, Hatcher DW, Tyler RT, Toews R, Gawalko E. Effect of cooking on the composition of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and chickpeas (*Cicer arietinum* L.). *Food Res. Int.* 43: 589-594 (2010).
- [3] Rachwa-Rosiak D, Nebesny E, Budryn G. Chickpeas-composition, nutritional value, health benefits, application to bread and snacks: A review. *Crit. Rev. Food Sci.* 55: 1137-1145 (2015).
- [4] Extrudates from vegetable raw materials with an increased content of lipids and food fibers / A.A. Kurochkin, P.K. Voronin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // *Technics and technology of food production.* 2016. No. 3 (42). pp. 104-111.
- [5] Potapov M.A., Frolov D.I., Kurochkin A.A. Optimization of the number of holes in the die of a single-screw extruder for processing poultry manure // *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy.* 2020. T. 5. No. 4. pp. 42–48.
- [6] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Voronina P.K. Determination of the main parameters of the vacuum chamber of the modernized extruder // *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy.* 2015. No. 4 (32). pp. 172-177.
- [7] Increasing the efficiency of extrudate dewatering in the vacuum chamber of the modernized extruder / D.I. Frolov [and others] // *Niva of the Volga region.* 2019. No. 2 (51). pp. 134-143.
- [8] Theoretical substantiation of the thermal vacuum effect in the working process of the modernized extruder / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // *News of the Samara State Agricultural Academy.* 2015. No. 3. pp. 15–20.
- [9] Rational technological parameters in the production of a multicomponent composite based on flax seeds / V.M. Zimnyakov, O. N. Kukharev, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // *Niva Volga region.* 2017. No. 4 (45). pp. 157-163.

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>Кручинина Наталья Эдуардовна аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(965) 633-85-85 E-mail: kruchininane@gmail.com</p>	<p>Kruchinina Natalia Eduardovna postgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(965) 633-85-85 E-mail: kruchininane@gmail.com</p>