

УДК 664.769

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЛАЖНОСТИ И ИНДЕКСА РАСШИРЕНИЯ ЭКСТРУДАТА ОВСА

Фролов Д.И., Курочкин А.А.

---

Объектом исследования является экструдер с вакуумной камерой. Для получения заданных свойств экструдата овса с помощью математического моделирования и платформы Microsoft.NET Framework на языке C# разработана прикладная программа, позволяющая осуществить расчет моделируемых свойств экструдата овса на основе начальных значений. Цель данного исследования – разработка прикладной программы для получения оперативной информации в части результатов моделируемых свойств экструдата овса (влажность экструдата, индекс расширения экструдатов) в экструдере с вакуумной камерой. Реализация задач математического моделирования была достигнута с помощью корреляционно-регрессионного анализа в среде Statistica 10. Разработка программы осуществлена в Microsoft Visual Studio Express 2013 для Windows Desktop, язык C#. С помощью полученных математических моделей и разработанной на их основе прикладной программы можно быстро и с достаточной точностью получить расчетным путем численные значения влажности и индекса расширения экструдата овса. Использование разработанной программы позволит уменьшить трудоемкость и повысить экономическую эффективность получения экструдатов с заранее планируемыми технологическими свойствами.

**Ключевые слова:** *экструдат, растительное сырье, влажность, коэффициент расширения.*

---

### Введение

Современная технология термопластической экструзии сырья растительного происхождения позволяет получать большой ассортимент полуфабрикатов и готовых пищевых продуктов [1]. При этом из всех известных видов макроструктур получаемых экструдатов, пористая структура представляет наибольший интерес, так как именно ее физические свойства (индекс расширения, набухаемость, водоудерживающую способность, растворимость, жирудерживающую способность) являются определяющими в процессе формирования показателей качества готовых пищевых продуктов.

Известно, что пористость экструдатов в первую очередь обусловлена количеством содержащихся в обрабатываемом сырье крахмала и воды, а также интенсивностью сброса давления и последующего за этим испарения воды из сырья при выходе его из фильеры экструдера.

В связи с тем, что в условиях пониженного давления вода испаряется при температуре, которая значительно ниже температуры парообразования при атмосферном давлении, необходимая интенсивность декомпрессионного воздействия на сырье может быть получена за счет замены атмосферного давления на пониженное давление (вакуум) при выходе его из фильеры, [2, 3].

При этом регулируя величину барометрического давления, а значит и процесс парообразования, можно добиться как изменения влажности капиллярно-пористого экструдата, так и частичной

или полной его реструктуризации. Зная границы структурных изменений экструдата, параметры вакуумного воздействия на него необходимо выбирать именно из таких соображений.

Изучение реакции капиллярно-пористых экструдатов на среду с пониженным давлением воздуха показало, что один из возможных векторов развития пищевой термопластической экструзии связан с эффектом термовакuumного воздействия на экструдированное сырье после выхода его из фильеры матрицы экструдера.

Также использование смеси зерна пшеницы с растительным материалом при экструдировании кормов позволяет сократить расход зерна, направляемого на фуражные цели [4].

Разработанный нами способ экструдирования крахмалсодержащего сырья на основе термовакuumного эффекта был реализован с помощью одношнекового пресс-экструдера, укомплектованный вакуумной камерой и шлюзовым затвором.

При быстром переходе влажного сырья с падением давления в камеру с пониженным давлением, происходит декомпрессионный взрыв: вода, находящаяся в сырье, переходит в пар с выделением значительного количества энергии, что приводит к деструкции клеточных структур обрабатываемого сырья и раздуванию получаемого продукта.

### Объекты и методы исследований

Изучение влияния технологических факторов процесса экструзии на структуру экструдата прово-

дились с помощью экспериментальной установки, в состав которой входил одношнековый пресс-экструдер, укомплектованный вакуумной камерой.

Были изучены математические модели экструзии биополимеров и математические методы исследования данных процессов [5-9].

Обработка экспериментальных данных, проводилась с помощью корреляционно-регрессионного анализа в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 10.

Прикладная программа была разработана с помощью платформы Microsoft.NET Framework на языке C#.

### Результаты и их обсуждение

После проведения эксперимента были обработаны полученные данные и выявлены зависимости влажности экструдата овса от давления в вакуумной камере экструдера (рис. 1) в виде следующих уравнений

$$\begin{aligned} W_{10} &= 3,85 \cdot e^{6,67P} \\ W_{14} &= 4,33 \cdot e^{9,14P} \\ W_{18} &= 4,71 \cdot e^{9,51P} \end{aligned} \quad (1)$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что переход экструдированного продукта из области высокого давления (2,0-2,7 МПа) в вакуумную камеру с давлением 0,02-0,09 МПа позволяет значительно интенсифицировать процесс удаления воды из обрабатываемого сырья.

Следующим этапом экспериментальных исследований являлась оценка влияния технологических факторов экструзионного процесса и технических параметров экструдера на индекс расширения экструдатов.

Для построения математической модели процесса получения экструдата в виде полинома вто-

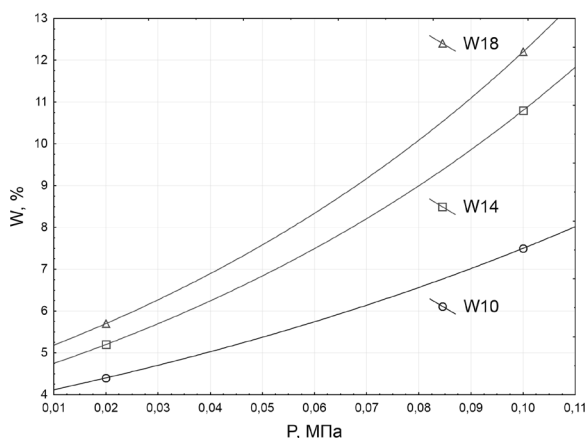


Рис. 1. Зависимость влажности экструдата овса от давления в вакуумной камере экструдера

рой степени был реализован 3-х факторный центральный композиционный план (число опытов – 16, число кубических точек – 8, число звездных точек – 6, число центральных точек – 2). Уровни варьирования факторов соответствовали: влажность обрабатываемого зерна (W) – 10; 14; 18%; значение вакуума в вакуумной камере экструдера (P) – 0,02; 0,04; 0,06 МПа и диаметр отверстия фильеры матрицы (d) – 4; 6; 8 мм. За критерий качества был принят индекс расширения экструдатов (B).

После выполнения статистической обработки экспериментальных данных с помощью корреляционно-регрессионного анализа в Statistica 10 была получена математическая модель второго порядка, адекватно описывающая зависимость индекса расширения экструдатов (коэффициента взрыва) от исследуемых факторов:

$$B = -0,9654 + 0,2823W - 0,0051W^2 + 0,2603d - 0,0291d^2 + 41,6415P - 247,1807P^2 \quad (2)$$

Качественные показатели полученной математической модели следующие:

- существует высокая сила связи между переменными (указывает множественный коэффициент корреляции  $R=0,94$ );

- в полученной модели 88 % изменчивости (коэффициент детерминации  $R^2=0,88$ ) объясняется исследуемыми факторами (доля дисперсии зависимых переменных) и лишь 12 % – ошибками модели (доля необъясненной дисперсии);

- модель с высоким уровнем доверия (статистическая значимость результатов экспериментов составляет  $p<0,01$ ).

Для практического применения полученных результатов моделей и зависимостей была разработана прикладная программа для операционной системы Windows (рис. 2). Программа написана на языке C# платформы Microsoft.NET Framework и скомпилирована в исполняемый файл.

Данная программа «Расчет свойств экструдата овса» позволяет рассчитать влажность экструдата овса согласно уравнениям (1) с достаточно высоким коэффициентом корреляции ( $R=0,97$ ) по отношению к полученным экспериментальным значениям. При этом область ограничения математической модели принята для начальных значений давления в диапазоне от 0,02 до 0,1 МПа и влажности начального сырья 10-18%.

Расчет индекса расширения экструдата производится по математической модели (2) с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,88$ , что свидетельствует о наличии достаточно тесной функциональной зависимости между изучаемыми факторами и критерием качества экструдатов. Область ограничений факторов для этой модели: влажность обрабатываемого зерна 10-18%; значение вакуума в вакуумной камере экструдера 0,02-0,06 МПа и диаметр отверстия фильеры матрицы 4-8 мм.



Рис. 2. Интерфейс программы расчета моделируемых влажности и индекса расширения экструдата овса:

а – ввод значения давления в вакуумной камере экструдера; б – вывод смоделированной влажности экструдата овса при влажности начального сырья 10, 14, 18 %; в – ввод значения влажности обрабатываемого зерна; г – ввод значения вакуума в вакуумной камере экструдера; д – ввод значения диаметра отверстия фильеры матрицы; е – вывод полученного значения индекса расширения экструдата.

### 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] В.В. Матюшев, И.А. Чаплыгина, Н.И. Селиванов, Н.И. Чепелев Оценка эффективности производства экструдированных кормов на основе смеси зерна и растительных компонентов // Вестник КрасГАУ. 2015. №11. С.140-145.
- [5] Altan, A., McCarthy, K.L., & Maskan, M. (2009). Effect of screw configuration and raw material on some properties of barley extrudates. *Journal of Food Engineering*, 92, P. 377–382.
- [6] Alves, M.V.C., Barbosa, J.R., & Prate, A.T. (2009). Analytical solution of single screw extrusion applicable to intermediate values of screw channel aspect ratio. *Journal of Food Engineering*, 92, P.152–156.
- [7] Bruin, S., van Zuilichem, D.J., & Stolp, W. (1978). A review of fundamental and engineering aspects of extrusion of biopolymers in a single-screw extruder. *Journal Food Process Engineering*, 2, P. 1–37.
- [8] Ganjyal, G.M., Hanna, M.A., & Jones, D.D. (2003). Modeling selected properties of extruded waxy maize cross-linked starches with neural networks. *Journal of Food Science*, 68(4), P. 1384-1388.
- [9] Klein, I., & Marshall, D.I. (1966). Mathematical models of extrusion. *Industrial & Engineering Chemistry*, 43058, P. 36-39.

В разработанной прикладной программе расчета свойств экструдата овса на основе математических моделей можно быстро получить значения моделируемой влажности экструдата овса полученного в экструдере с вакуумной камерой. Для этого необходимо лишь ввести значение давления в вакуумной камере в поле ввода в диапазоне от 0,02 до 0,1 МПа.

Для расчета индекса расширения экструдата овса на основе математической модели необходимо ввести в три поля значения соответственно влажности обрабатываемого зерна (10-18%), вакуума в вакуумной камере экструдера (0,02-0,06 МПа), диаметр отверстия фильеры матрицы (4-8 мм).

### Выводы

Прикладная программа расчета свойств экструдата овса позволяет рассчитать влажность и индекс расширения экструдата при использовании предлагаемого экструдера с вакуумной камерой с достаточно высокой достоверностью полученных значений.

---

## THE DEVELOPMENT OF A COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING THE MOISTURE CONTENT AND THE EXPANSION INDEX OF OAT EXTRUDATE

*Frolov D.I., Kurochkin A.A.*

---

The object of this study is to the extruder with a vacuum chamber. To obtain the desired properties of oats extruded using mathematical modeling and Microsoft.NET Framework platform in C # developed an application that allows you to carry out simulated calculation of properties of oats extrudate based on the initial values. The purpose of this study - the development of an application to obtain timely information regarding the results of the simulated properties of extruded oats (moisture extrudate expansion index extrudates) in an extruder with a vacuum chamber. Implementation of mathematical modeling tasks was achieved with the help of regression analysis in the environment Statistica 10. Develop a program implemented in Microsoft Visual Studio Express 2013 for Windows Desktop, C # language. With the help of mathematical models obtained and developed on the basis of their application quickly and with sufficient accuracy to obtain numerical values calculated by the humidity index and the expansion of the extrudate oats. Using the developed program will reduce the labor intensity and improve the economic efficiency of production of extrudates with a pre-planned technological properties.

**Keywords:** *extrudate, vegetable raw materials, moisture expansion coefficient.*

---

### References

- [1] Ekstrudaty iz rastitel'nogo syr'ya s povyshennym soderzhaniiem lipidov i pishchevykh volokon / A.A. Kurochkin, P.K. Voronina, G.V. Shaburova, D.I. Frolov // *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv.* 2016. № 3 (42). P. 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). P. 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). P. 29–34.
- [4] V.V. Matyushev, I.A. Chaplygina, N.I. Selivanov, N.I. Chepelev Otsenka effektivnosti proizvodstva ekstrudirovannykh kormov na osnove smesi zerna i rastitel'nykh komponentov // *Vestnik KrasGAU.* 2015. №11. P.140-145.
- [5] Altan, A., McCarthy, K.L., & Maskan, M. (2009). Effect of screw configuration and raw material on some properties of barley extrudates. *Journal of Food Engineering*, 92, P. 377–382.
- [6] Alves, M.V.C., Barbosa, J.R., & Prate, A.T. (2009). Analytical solution of single screw extrusion applicable to intermediate values of screw channel aspect ratio. *Journal of Food Engineering*, 92, P.152–156.
- [7] Bruin, S., van Zuilichem, D.J., & Stolp, W. (1978). A review of fundamental and engineering aspects of extrusion of biopolymers in a single-screw extruder. *Journal Food Process Engineering*, 2, P. 1–37.
- [8] Ganjyal, G.M., Hanna, M.A., & Jones, D.D. (2003). Modeling selected properties of extruded waxy maize cross-linked starches with neural networks. *Journal of Food Science*, 68(4), P. 1384-1388.
- [9] Klein, I., & Marshall, D.I. (1966). Mathematical models of extrusion. *Industrial & Engineering Chemistry*, 43058, P. 36-39.