

ТЕХНОЛОГИИ, СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Научная статья

УДК 664.769

doi: 10.55471/19973225_2022_7_1_28

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТРИЦЫ ЭКСТРУДЕРА
НА СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ЭКСТРУДАТА**

Анатолий Алексеевич Курочкин¹, Дмитрий Иванович Фролов²

^{1,2} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ anatolii_kuro@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3824-4364>

² surr@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9166-1132>

Цель исследований – обоснование зависимости свойств экструдатов и удельной механической энергии экструзионного процесса от размерных характеристик матрицы экструдера. Приведено исследование влияния размерных характеристик отверстий матрицы экструдера на технологические свойства получаемого экструдированного продукта, в частности, на коэффициенты расширения экструдата и эффективность работы экструдера. Необходимые для обеспечения равномерного потока, а также правильной консистенции экструдированной смеси, конструктивные особенности и форма матрицы требуют больших теоретических и экспериментальных исследований. Для теоретического обоснования геометрических параметров матрицы экструдера и физических явлений, происходящих с сырьем, представлены уравнения потока жидкости через отверстие фильеры. Представлены уравнения для оценки падения давления через проходное сечение матрицы при заданной скорости потока сырья для неньютоновской смеси. Материал для экструзии – кукурузная крупа. Опыт проводили на лабораторном одношнековом экструдере ЭК-40. Матрицу с отверстиями выбирали в соответствии с планом эксперимента. Экспериментальные данные проанализированы с помощью дисперсионного анализа. Все статистические анализы выполнены с использованием программного обеспечения STATISTICA. Получены результаты влияния диаметра отверстия, длины канала отверстия матрицы и их отношения на удельную механическую энергию и коэффициенты расширения экструдата. С увеличением диаметра отверстия в матрице экструдера удельная механическая энергия снижается со 100 Дж/кг при диаметре отверстия 2 мм до 50 Дж/кг при диаметре отверстия 4 мм. Наибольшее влияние размер отверстия матрицы экструдера оказал на радиальный коэффициент расширения экструдата. При увеличении диаметра отверстия с 2 до 4 мм радиальный коэффициент расширения экструдата снизился приблизительно на 38 % – до 6,96. Увеличение радиального коэффициента расширения в основном происходит за счет уменьшения размера отверстия с ростом давления на матрицу. Длина канала отверстия матрицы слабо влияет на все коэффициенты расширения экструдата.

Ключевые слова: экструзия, матрица, свойства экструдата, кукуруза, коэффициент расширения.

Для цитирования: Курочкин А. А., Фролов Д. И. Влияние размерных характеристик матрицы экструдера на свойства получаемого экструдата // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №1. С. 28–37. doi: 10.55471/19973225_2022_7_1_28

Original article

INFLUENCE OF DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF THE EXTRUDER MATRIX ON THE PROPERTIES OF EXTRUDATE

Anatoly A. Kurochkin¹, Dmitry I. Frolov²

^{1,2}Penza State Technological University, Penza, Russia

¹anatolii_kuro@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3824-4364>

²surr@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9166-1132>

The purpose of the research is to substantiate the dependence of properties of extrudate and specific mechanical energy of the extrusion process on the dimensional characteristics of the extruder matrix. The study of influence of the dimensional characteristics of holes of an extruder matrix on processing properties of the resulting extruded product, in particular, on the expansion coefficients of an extrudate and efficiency of an extruder. The design features and the shape of a matrix which can ensure a uniform flow, as well as correct consistency of the extruded mixture, require extensive theoretical and experimental studies. To provide theoretical substantiation the geometric parameters of the extruder matrix and the physical occurrence with raw materials, the equations of fluid flow through spinneret holes are presented. The equations for estimating the pressure drop through the flow section of the matrix at a given rate of raw materials move for a non-Newtonian mixture are presented. The material for extrusion is corn grit. The experiments were carried out involving an experimental single-screw extruder type EK-40. The matrix with holes was chosen according to the experimental plan. The experimental data were analyzed using dispersion analysis. All statistical tests were performed using the STATISTICA software. The results of influence of a hole diameter, the length of the matrix channel and their ratio on the specific mechanical energy and the expansion coefficients of the extrudate were obtained. With an increase of diameter in the extruder spinneret hole, the specific mechanical energy decreases from 100 J/kg with a hole diameter of 2 mm to 50 J/kg with a one of 4 mm. The size of an extruder spinneret hole had the greatest impact on the radial expansion coefficient of the extrudate. With an increase of the hole diameter from 2 to 4 mm, the radial expansion coefficient of the extrudate decreased approximately by 38% to 6.96. The increase of the radial expansion coefficient is mainly due to a decrease of a hole with an increase of pressure on the matrix. The length of the spinneret hole of the matrix has little effect on all the expansion coefficients of the extrudate.

Keywords: extrusion, matrix, extrudate properties, corn, expansion coefficient.

For citation: Kurochkin, A. A. & Frolov, D. I. (2022). Influence of dimensional characteristics of the extruder matrix on the properties of extrudate. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 1, 28–37 (in Russ.). doi: 10.55471/19973225_2022_7_1_28

Экструзионные технологии находят все более широкое применение в сельскохозяйственном производстве и пищевой промышленности [1, 2, 3]. Они осуществляются с помощью экструдера, в котором обрабатываемое сырье перемещается в рабочем объеме машины и подвергается механическому и тепловому воздействию, а затем продавливается через отверстия матрицы [4]. Хотя исследования этих технологий ведутся уже много лет, понимание изменений сырья в процессе экструзии и влияния параметров процесса на качество готового продукта все еще достаточно ограничено [5].

Экструдеры рационализируют производственный процесс и минимизируют эксплуатационные расходы, сочетая универсальность и энергоэффективность [6]. Тем не менее, реологические свойства и гидродинамическое поведение сельскохозяйственного сырья делают экструзию очень сложным процессом [7, 8]. Компоненты такого сырья при экструзии подвергаются различным воздействиям, в результате которых, например, в частицах крахмала осуществляется процессы желатинизации и молекулярной деградации вследствие термической и механической обработки [9, 10]. Во время экструзии механические силы сдвига, создаваемые шнеком, фрагментируют молекулы злаков, образуя углеводы с более легкой молекулярной массой [11, 12, 13].

Предыдущие экспериментальные исследования показали влияние на качество конечного

продукта конструктивных и технологических параметров, таких, как частота вращения шнека, температура и разрежение в вакуумной камере [14].

При этом выяснилось, что для контроля производительности экструдера и качества экструдата существенное значение имеет характер потока экструдированного сырья при выходе из матрицы экструдера. В свою очередь параметры потока и степень расширения экструдированного сырья зависят от размерных характеристик и конфигурации матрицы экструдера, а также давления воздуха в камере, куда поступает готовый продукт из фильеры матрицы машины.

Свойства матрицы экструдера связаны с несколькими важными особенностями при экструдировании. Во-первых, конфигурация и размеры отверстий матрицы определяют размеры получаемых полуфабрикатов или готовых продуктов. Не менее важными особенностями, которые необходимо учитывать, являются термодинамические и реологические процессы, происходящие в матрице при формовании. Все это оказывают решающее влияние на качество экструдированных полуфабрикатов [15]. Следовательно, при проектировании матрицы экструдера следует учитывать взаимосвязь потока, деформации и температуры сырья [16]. Таким образом, конструкция, форма и размерные характеристики матрицы, обеспечивающие заданные параметры и равномерность потока обрабатываемого сырья, требуют дальнейших экспериментальных исследований.

Для теоретического обоснования геометрических параметров матрицы экструдера важно учитывать физику процесса, происходящего с обрабатываемым сырьем во время экструзии. Для ньютоновских жидкостей поток Q через круглую фильеру матрицы при пренебрежении входными и выходными потерями, определяется выражением

$$Q = K \frac{\Delta P}{\mu_d}, \quad (1)$$

где ΔP – падение давления, Па;

μ_d – динамическая вязкость, Па·с;

K – коэффициент, м³, для круглого отверстия в матрице $K = \pi R^4 / 8L$;

R – радиус отверстия матрицы, м;

L – длина сопла отверстия матрицы, м.

Смесь, состоящая из увлажненных злаков, является неньютоновской жидкостью, и ее реологическое поведение очень сложное, варьирующееся в зависимости от различных параметров, таких как температура и содержание влаги [17]. Выбор подходящей реологической модели важен для точности результатов моделирования: реологические характеристики напрямую влияют на поведение потока материала, теплопередачу и давление внутри экструдера. Для такого рода жидкостей вязкость является функцией скорости сдвига, и существует нелинейная связь между потоком жидкости, проходящим через круглое отверстие матрицы, и падением давления [18].

Для оценки падения давления через проходное сечение матрицы при заданной скорости потока сырья для неньютоновской смеси сначала рассчитывают скорость сдвига и напряжение сдвига. Для матрицы с круглым поперечным сечением скорость сдвига на стенке и касательное напряжение на стенке определяются как

$$\gamma_w = \frac{3n+1}{4n} \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right) \text{ и } \tau_w = \frac{R\Delta P}{2L}, \quad (2)$$

где γ_w – скорость сдвига на стенке, с⁻¹;

n – показатель поведения жидкости;

τ_w – касательное напряжение на стенке, Н/м².

После определения скорости сдвига может быть определена структурная вязкость по экспериментальным данным или реологической модели рассматриваемой смеси.

Поскольку структурная вязкость – это отношение касательного напряжения сдвига к скорости сдвига, то падение давления на матрице может быть рассчитано напрямую

$$\tau = m\gamma^n, \quad (3)$$

где τ – касательное напряжение, Н/м²;

m – показатель консистенции, Па·с;

γ – скорость сдвига, с⁻¹.

Ранее изучено влияние размерных характеристик отверстий матрицы экструдера на свойства готовых продуктов на основе разработанной модели влияния скорости экструзионной обработки на расширение и текстурные свойства экструдатов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что наиболее высокий индекс расширения экструдата можно получить для отношения длины отверстия матрицы к его диаметру, равном 3,4. Дальнейший рост этого показателя приводит к уменьшению индекса расширения экструдата.

Одновременно выявлена связь крутящего момента привода экструдера с величиной энергии, поглощаемой сырьем в процессе сдвига его частиц во время экструзионной обработки. Подтверждено, что непосредственное влияние на крутящий момент оказывает шнек экструдера и размерные характеристики отверстия матрицы. Вследствие этого геометрические характеристики матрицы экструдера и конкретнее размеры отверстий в матрице являются существенными факторами, влияющими на качественные показатели получаемого экструдированного продукта. Таким образом, размерные характеристики отверстий в матрице экструдера могут оказывать влияние не только на индекс расширения экструдата, но и на общую производительность экструдера. Оценить долю влияния конфигурации матрицы на производительность экструдера возможно на основе рассмотрения показателя удельной механической энергии.

Цель исследований – обоснование зависимости свойств экструдатов и удельной механической энергии экструзионного процесса от размерных характеристик матрицы экструдера.

Задачи исследований – определить влияние диаметра и длины отверстия матрицы экструдера, а также их соотношения, на индекс расширения и удельную механическую энергию.

Материал и методы исследований. Экструзионной обработке подвергали кукурузную крупу, полученную с помощью электрической мельницы. Крупу смешивали с водой до достижения влажности 20 %, а затем образцы обрабатывали в лабораторном одношнековом экструдере ЭК-40. Экструдер оснащен рабочим шнеком диаметром 40 мм, отношение длины шнека к его диаметру составляло 4:1, а температурный режим 140/170 °С поддерживали за счет фиксированной частоты вращения шнека.

Матрицу с отверстиями выбирали в соответствии с планом эксперимента. Температуру на кожухе шнека регистрировали с помощью мультиметра и датчика температуры. Крутящий момент на валу экструдера регистрировали с помощью датчика крутящего момента.

Удельную механическую энергию (УМЭ) рассчитывали по формуле (4) на основе полученных результатов эксперимента [19]:

$$\text{УМЭ} = \frac{M_p \cdot n}{Q}, \quad (4)$$

где УМЭ – удельная механическая энергия (Дж/кг);

M_p – крутящий момент при проталкивании сырья, Н·м;

n – частота вращения шнека, с⁻¹;

Q – массовый расход, кг/ч.

Размерные характеристики матриц, используемых в каждом эксперименте, приведены в таблице 1. Экспериментальный план был полностью рандомизирован и проведен 3 раза. Отношения L/D рассчитывали путем деления длин сопел отверстий на их диаметр. Экспериментальные данные проанализированы с помощью дисперсионного анализа. Все статистические анализы выполнены с использованием программного обеспечения STATISTICA. Общий коэффициент расширения (KРобщ) рассчитан путем деления плотности экструдированного продукта на объемную плотность. Радиальный коэффициент расширения (KРрад) определяли, как отношение между диаметром экструдатов (измеренным с помощью цифрового штангенциркуля) и диаметром отверстия матрицы экструдера. Осевой коэффициент расширения (KРос) был рассчитан путем деления общего коэффициента расширения на радиальный коэффициент расширения. При снятии измерений выбирали среднее значение из шести измерений.

Размерные характеристики отверстий матриц экструдера для каждого эксперимента

Влияние диаметра отверстия D			Влияние длины канала отверстия L			Влияние отношения L/D		
L, мм	D, мм	L/D	L, мм	D, мм	L/D	L, мм	D, мм	L/D
15	2	7,5	10	3	3,33	6	3	2,00
15	2,5	6	14	3	4,67	14	4	3,50
15	3	5	30	3	10,00	20	3	6,67
15	4	3,75	40	3	13,33	30	3	10,00

Твердость экструдатов оценивали путем измерения максимального усилия, необходимого для их разрушения. Объемную плотность определяли путем взвешивания массы экструдатов, необходимых для заполнения контейнера емкостью 1000 мл. Ее рассчитывали, как отношение массы к единице объема.

Результаты исследований. Для определения влияния диаметра отверстия матрицы на удельную механическую энергию (УМЭ) и коэффициенты расширения экструдата (KРобщ, KРрад, KРос) были использованы данные, представленные в таблице 1. На рисунке 1 изображена диаграмма влияния диаметра отверстия матрицы на удельную механическую энергию (УМЭ) и коэффициенты расширения экструдата (KРобщ, KРрад, KРос).

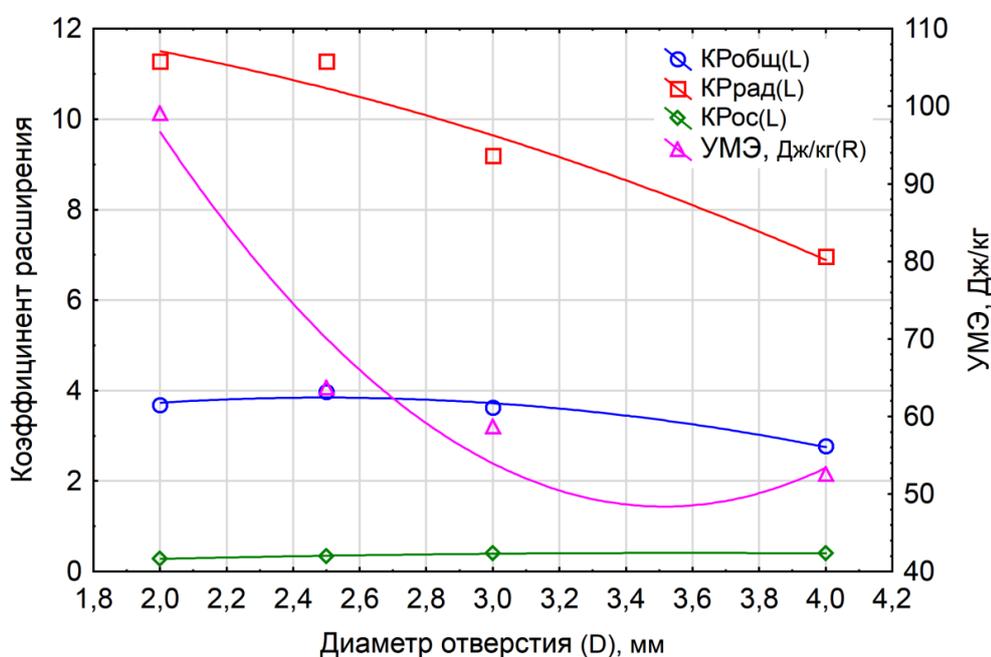


Рис. 1. Диаграмма влияния диаметра отверстия матрицы на удельную механическую энергию (УМЭ) и коэффициенты расширения экструдата (KРобщ, KРрад, KРос)

Анализируя изображенные графические зависимости, можно обратить внимание на достаточно сильное влияние диаметра отверстия матрицы экструдера на удельную механическую энергию. С увеличением диаметра отверстия в матрице экструдера удельная механическая энергия снижается со 100 Дж/кг при диаметре отверстия 2 мм до 50 Дж/кг при диаметре отверстия 4 мм. Снижение произошло практически пропорционально в 2 раза. Полученный результат подтверждается теорией о том, что крутящий момент двигателя зависит от поглощаемой материалом энергии из-за сдвига в процессе экструзии.

Регрессионный анализ показал, что зависимость удельной механической энергии от диаметра отверстия имеет нисходящий тренд с увеличением диаметра. Модель полиномиальной регрессии второго порядка это подтверждает:

$$УМЭ = 308,7965 - 148,2173 \cdot D + 21,09 \cdot D^2 . \quad (5)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,947$; уровень значимости $p = 0,23$.

Наибольшее влияние размер отверстия матрицы экструдера оказал на радиальный

коэффициент расширения экструдата. При увеличении диаметра отверстия с 2 до 4 мм радиальный коэффициент расширения экструдата снизился приблизительно на 38 %, до 6,96. Изменение диаметра отверстия незначительно повлияло на осевой коэффициент расширения, его среднее значение колебалось около 0,36. Снижение общего коэффициента расширения произошло в среднем на 0,96.

На рисунке 2 изображена диаграмма влияния длины канала отверстия матрицы на удельную механическую энергию (УМЭ) и коэффициенты расширения экструдата (КРобщ, КРрад, КРос).

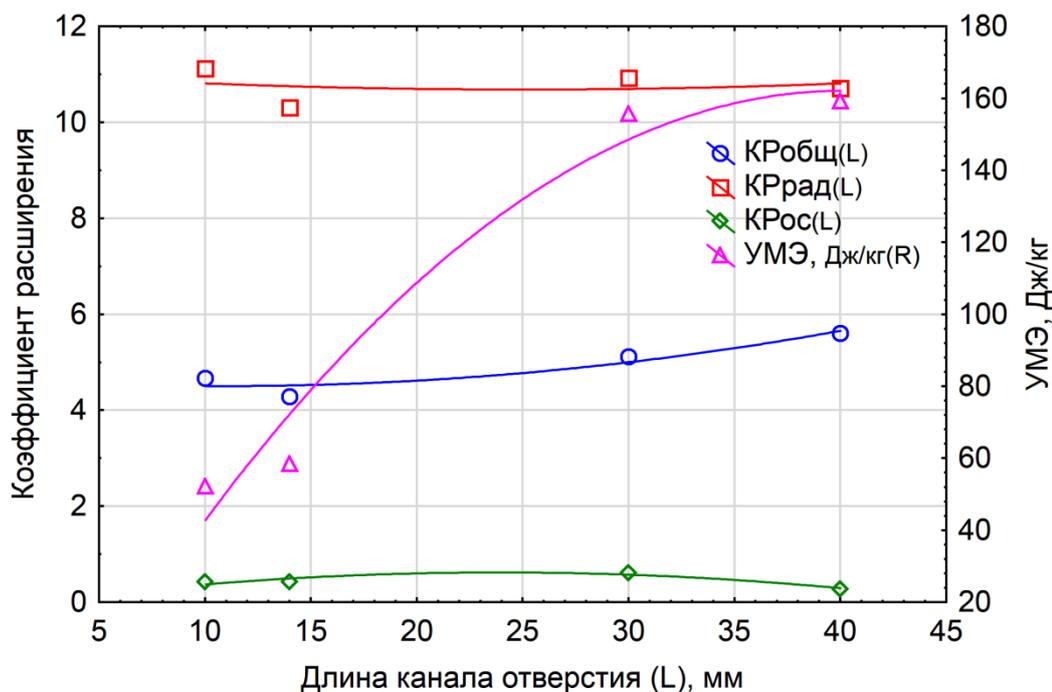


Рис. 2. Диаграмма влияния длины канала отверстия матрицы на удельную механическую энергию (УМЭ) и коэффициенты расширения экструдата (КРобщ, КРрад, КРос)

Для определения влияния длины канала отверстия матрицы были использованы матрицы с длиной от 10 до 40 мм и постоянным диаметром отверстия.

Статистический анализ показал, что на удельную механическую энергию существенно оказывает влияние длина канала отверстия матрицы экструдера. При увеличении длины канала отверстия матрицы с 10 до 40 мм удельная механическая энергия возросла от 52 до 159 Дж/кг. То есть при увеличении длины канала в 4 раза удельная механическая энергия возросла в 3,05 раза. Полученный результат хорошо коррелирует с теоретическими зависимостями, в которых удельная механическая энергия является функцией массового расхода сырья Q , который, в свою очередь, зависит от структурной вязкости и падения давления в матрице экструдера.

Зависимость удельной механической энергии от длины канала отверстия матрицы представляет собой полиномиальную регрессию второго порядка. Полученная модель указывает на тенденцию увеличения удельной механической энергии в случае возрастания длины канала отверстия матрицы.

$$\text{УМЭ} = -49,7317 + 10,5475 \cdot L - 0,1313 \cdot L^2 \quad (6)$$

Для приведенного уравнения коэффициент детерминации R^2 и уровень значимости (p) равны соответственно 0,983 и 0,18.

Общий коэффициент расширения показал тенденцию роста при увеличении длины канала отверстия матрицы экструдера. При изменении этого показателя с 10 до 40 мм общий коэффициент расширения вырос на 16,7 %. В целом радиальный и осевой коэффициенты расширения колебались около своих средних значений и были равны в среднем $\text{КРрад(ср)} = 10,77$ и $\text{КРос(ср)} = 0,43$.

На рисунке 3 изображена диаграмма влияния отношения длины канала к диаметру отверстия

матрицы L/D на удельную механическую энергию (УМЭ) и коэффициенты расширения экструдата ($K_{Робщ}$, $K_{Ррад}$, $K_{Рос}$).

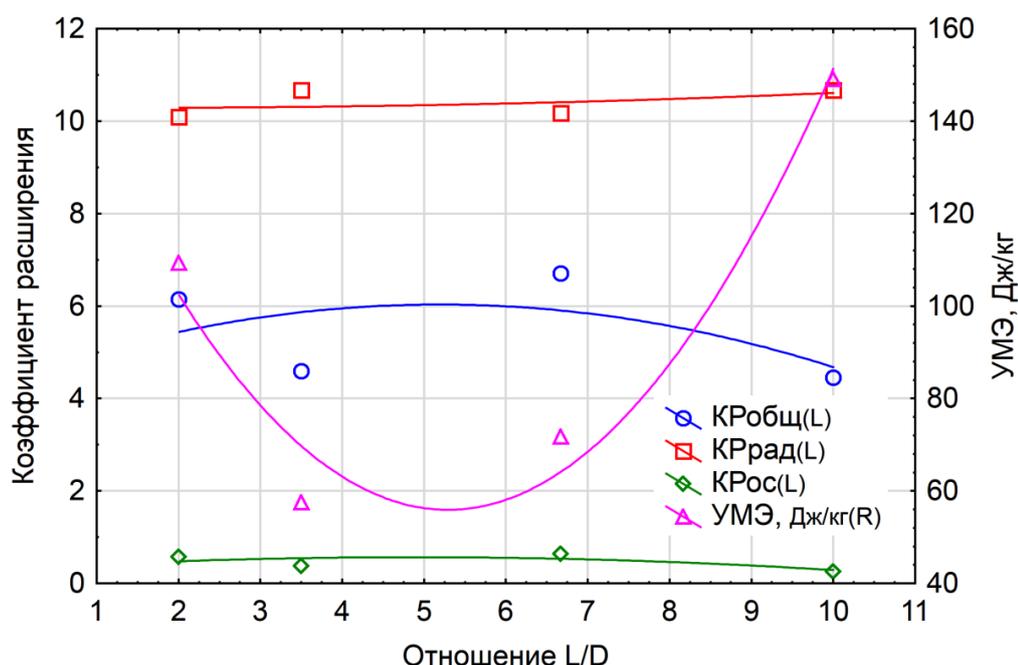


Рис. 3. Диаграмма влияния отношения длины канала к диаметру отверстия матрицы на удельную механическую энергию (УМЭ) и коэффициенты расширения экструдата ($K_{Робщ}$, $K_{Ррад}$, $K_{Рос}$)

Для определения влияния отношения длины канала отверстия матрицы к диаметру отверстия (L/D) были подобраны матрицы с диаметром 3 и 4 мм, длиной от 5 до 30 мм. Отношения L/D составили соответственно 2; 3,5; 6,67; 10.

Результаты показали аналогичное поведение удельной механической энергии, как и в предыдущем опыте по изменению длины канала отверстия. Удельная механическая энергия возрастает с увеличением отношения L/D .

Полученный результат подтверждается уравнением регрессии:

$$\text{УМЭ} = 176,4136 - 45,5402 \cdot (L/D) + 4,3029 \cdot (L/D)^2. \quad (7)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,974$; уровень значимости $p = 0,22$.

Влияние отношения длины канала отверстия матрицы к диаметру отверстия (L/D) на коэффициенты расширения экструдата ($K_{Робщ}$, $K_{Ррад}$, $K_{Рос}$) было не существенно. Средние значения данных коэффициентов составили: $K_{Ррад}(ср) = 10,4$; $K_{Рос}(ср) = 0,46$; $K_{Робщ}(ср) = 5,47$.

Заключение. Резюмируя полученные результаты и сопоставляя их с предварительно выдвинутыми научными гипотезами, можно сделать вывод, что производительность экструдера зависит от трех видов потока смеси в стволе экструдера: напорного потока, потока сопротивления и потока утечки. Поток сопротивления, зависящий от структурной вязкости и технологических параметров процесса экструзии, был постоянным. Давление на матрицу экструдера влияло на два остальных вида потока смеси. Падение давления и скорость потока смеси зависят от размерных характеристик матрицы экструдера, что и было подтверждено экспериментально. Увеличение радиального коэффициента расширения в основном происходит за счет уменьшения размера отверстия и сопутствующего этому явлению возрастающего давления на матрицу. Длина канала отверстия матрицы слабо влияет на все коэффициенты расширения экструдата. Отсюда очевидно, что для существенного радиального расширения экструдата необходимо использовать минимально возможные отверстия в матрице экструдера. При этом с целью экономии энергии, используемой для экструзии, длина канала матрицы может быть минимально допустимой, так как она не оказывает существенного влияния на качество получаемого экструдата.

Список источников

1. 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.
2. Comettant-Rabanal R., Carvalho C. W. P., Ascheri J. L. R., Chávez D. W. H. Germani, R. Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread // *LWT*. 2021. Vol. 150. P. 112042. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112042>
3. Wang Q., Li L., Wang T., Zheng X. A review of extrusion-modified underutilized cereal flour: chemical composition, functionality, and its modulation on starchy food quality // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 370. P. 131361.
4. Senanayake S.A.M.A.N.S., Clarke B. A simplified twin screw co-rotating food extruder: design, fabrication and testing // *Journal of Food Engineering*. 1999. Vol. 40, № 1. P. 129–137. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00049-7)
5. Cheng H., Friis A. Modelling extrudate expansion in a twin-screw food extrusion cooking process through dimensional analysis methodology // *Food and Bioproducts Processing*. 2010. Vol. 88, № 2. P. 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.01.001>
6. Frolov D. I., Kurochkin A. A. Aerodynamic study of an ejector in a modernized device for thermal vacuum extrusion of food products // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 954, № 1. P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012030>
7. Roye C., Henrion M., Chanvrier H., Loret C., King R., Lamothe L., Courtin C. M. Changing Wheat Bran Structural Properties by Extrusion-Cooking on a Pilot and Industrial Scale: A Comparative Study // *Foods*. 2021. Vol. 10, № 2. P. 472. <https://doi.org/10.3390/foods10020472>
8. Roye C., Henrion M., Chanvrier H., De Roeck K., De Bondt Y., Liberloo I., King R., Courtin C. M. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran // *Foods*. 2020. Vol. 9, № 6. P. 738. <https://doi.org/10.3390/foods9060738>
9. Yang Z., Zhou Y., Xing J.-J., Guo X.-N., Zhu K.-X. Effect of superheated steam treatment and extrusion on lipid stability of black soybean noodles during storage // *Food Control*. 2021. July. P. 108388.
10. Jia W.-T., Yang Z., Guo X.-N., Zhu K.-X. Effect of superheated steam treatment on the lipid stability of whole wheat flour // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 363. P. 130333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130333>
11. Wang B., Dong Y., Fang Y., Gao W., Kang X., Liu P., Yan S., Cui B., Abd El-Aty A. M. Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 368. P. 130804. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130804>
12. Pietsch V. L., Schöffel F., Rädle M., Karbstein H. P., Emin M. A. High moisture extrusion of wheat gluten: Modeling of the polymerization behavior in the screw section of the extrusion process // *Journal of Food Engineering*. 2019. Vol. 246. P. 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.031>
13. Robin F., Bovet N., Pineau N., Schuchmann H. P., Palzer S. Online shear viscosity measurement of starchy melts enriched in wheat bran // *Journal of Food Science*. 2011. T. 76, № 5. P. E405-412. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02193.x>
14. Kurochkin A. A., Frolov D. I., Zimnyakov V. M. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 640, № 7. P. 072018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/7/072018>
15. Королев А. А. Разработка технологических режимов экструзии зерноовощных пищевых концентратов // *Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук российской академии наук*. 2016. № 1. С. 163–168.
16. Roye C., Chanvrier H., Henrion M., De Roeck K., De Bondt Y., Liberloo I., King R., Courtin C. M. Single-pass, double-pass and acid twin-screw extrusion-cooking impact physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 66. P. 102520. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102520>
17. Wolz M., Kastenhuber S., Kulozik U. High moisture extrusion for microparticulation of whey proteins – Influence of process parameters // *Journal of Food Engineering*. 2016. Vol. 185. P. 56–61.
18. Roland W., Marschik C., Krieger M., Löw-Baselli B., Miethlinger J. Symbolic regression models for predicting viscous dissipation of three-dimensional non-Newtonian flows in single-screw extruders // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 268. P. 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2019.04.006>
19. Maung The-Thiri, Gu Bon-Yeob, Ryu G. Influence of extrusion process parameters on specific mechanical energy and physical properties of high-moisture meat analog // *International journal of food engineering*. 2020. T. 17, № 2. С. 149–157. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0042>

1. Bakhchevnikov, O. N. & Braginets, S. V. (2020). Extrusion of vegetable raw materials for food (review). *Tekhnika i tekhnologiya pishchevyykh proizvodstv (Technique and technology of food production)*, 50(4), 690–706 (in Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-690-706>
2. Comettant-Rabanal, R., Carvalho, C. W. P., Ascheri, J. L. R., Chávez, D. W. H. & Germani, R. (2021). Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread. *LWT*, 150, 112042. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112042>
3. Wang Q., Li L., Wang, T. & Zheng, X. (2022). A review of extrusion-modified underutilized cereal flour: Chemical composition, functionality, and its modulation on starchy food quality. *Food Chemistry*, 370, 131361. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131361>
4. Senanayake, S. A. M. A. N. S. & Clarke, B. (1999). A simplified twin screw co-rotating food extruder: Design, fabrication and testing. *Journal of Food Engineering*, 40(1), 129–137. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00049-7)
5. Cheng, H. & Friis, A. (2010). Modelling extrudate expansion in a twin-screw food extrusion cooking process through dimensional analysis methodology. *Food and Bioprocess Processing*, 88(2), 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.01.001>
6. Frolov, D. I. & Kurochkin, A. A. (2022). Aerodynamic study of an ejector in a modernized device for thermal vacuum extrusion of food products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 954(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/954/1/012030>
7. Roye, C., Henrion, M., Chanvrier, H., Loret, C., King, R., Lamothe, L. & Courtin, C. M. (2021). Changing Wheat Bran Structural Properties by Extrusion-Cooking on a Pilot and Industrial Scale: A Comparative Study. *Foods*, 10(2), 472. <https://doi.org/10.3390/foods10020472>
8. Roye, C., Henrion, M., Chanvrier, H., De Roeck, K., De Bondt, Y., Liberloo, I., King, R. & Courtin, C. M. (2020). Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran. *Foods*, 9(6), 738. <https://doi.org/10.3390/foods9060738>
9. Yang, Z., Zhou, Y., Xing, J.-J., Guo, X.-N. & Zhu, K.-X. (2021). Effect of superheated steam treatment and extrusion on lipid stability of black soybean noodles during storage. *Food Control*, 108388. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108388>
10. Jia, W.-T., Yang, Z., Guo, X.-N. & Zhu, K.-X. (2021). Effect of superheated steam treatment on the lipid stability of whole wheat flour. *Food Chemistry*, 363, 130333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130333>
11. Wang, B., Dong, Y., Fang, Y., Gao, W., Kang, X., Liu, P., Yan, S., Cui, B. & Abd El-Aty, A. M. (2022). Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion. *Food Chemistry*, 368, 130804. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130804>
12. Pietsch, V. L., Schöffel, F., Rädle, M., Karbstein, H. P. & Emin, M. A. (2019). High moisture extrusion of wheat gluten: Modeling of the polymerization behavior in the screw section of the extrusion process. *Journal of Food Engineering*, 246, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.031>
13. Robin, F., Bovet, N., Pineau, N., Schuchmann, H. P. & Palzer, S. (2011). Online shear viscosity measurement of starchy melts enriched in wheat bran. *Journal of Food Science*, 76(5), E405-412. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02193.x>
14. Kurochkin, A. A., Frolov, D. I. & Zimnyakov, V. M. (2021). Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 640(7), 072018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/7/072018>
15. Korolev, A. A. (2016). Development of extrusion process regime of grain and vegetable food concentrates. *International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences*, 1 (pp. 163–168) (in Russ.).
16. Roye, C., Chanvrier, H., Henrion, M., De Roeck, K., De Bondt, Y., Liberloo, I., King, R. & Courtin, C. M. (2020). Single-pass, double-pass and acid twin-screw extrusion-cooking impact physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102520. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102520>
17. Wolz, M., Kastenhuber, S. & Kulozik, U. (2016). High moisture extrusion for microparticulation of whey proteins – Influence of process parameters. *Journal of Food Engineering*, 185, 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.002>
18. Roland, W., Marschik, C., Krieger, M., Löw-Baselli, B. & Miethlinger, J. (2019). Symbolic regression models for predicting viscous dissipation of three-dimensional non-Newtonian flows in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 268, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2019.04.006>
19. Maung, The-Thiri, Gu, Bon-Yeob, Ryu, G. (2020). Influence of extrusion process parameters on specific mechanical energy and physical properties of high-moisture meat analog. *International Journal of Food Engineering*, 17(2), 149–157. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0042>

Информация об авторах

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

Information about the authors

A. A. Kurochkin – Doctor of Technical Sciences, Professor;
D. I. Frolov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

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 26.12.2021; одобрена после рецензирования 11.01.2022; принята к публикации 18.02.2022.

The article was submitted 26.12.2021; approved after reviewing 11.01.2022; accepted for publication 18.02.2022.