

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-1-158-165

УДК 664.769: 66.011

Моделирование и оптимизация воздействия вакуума на степень расширения зернового экструдата

А. А. Курочкин✉, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые производства»

Д. И. Фролов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые производства»

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

440039, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11

✉ anatolii_kuro@mail.ru

Резюме. В работе исследовано влияние параметров вакуумной обработки – давления (10...50 кПа) и времени экспозиции (0...10 с) на коэффициент расширения зернового крахмального экструдата. Использована разработанная авторами экспериментальная установка на базе модернизированного экструдера ЭК-40 с интегрированной вакуумной камерой и физическая модель, полученная с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, учитывающая транспорт газа через пористую среду (закон Дарси), вязкоупругую деформацию твёрдого каркаса и геометрическое расширение продукта. Установлено, что максимальный коэффициент расширения (2,8...2,9) достигается при давлении 10 кПа и времени воздействия 1,1...1,2 с. При снижении давления ниже 8...10 кПа наблюдается эффект насыщения, обусловленный механическими ограничениями крахмального каркаса. Оптимальное время экспозиции, соответствующее 95 % от максимального расширения экструдата, составляет 1,0...1,1 с и слабо зависит от уровня вакуума. Модель верифицирована экспериментально: отклонение расчётных и измеренных значений не превышает 4 %. Результаты позволяют оптимизировать режимы термовакуумной экструзии и создают основу для цифрового проектирования подобных процессов в технологиях кормоприготовления и производства пищевых продуктов.

Ключевые слова: экструдер, термовакуумная экструзия, моделирование, коэффициент расширения, численное моделирование, вакуум.

Для цитирования: Курочкин А. А., Фролов Д. И. Моделирование и оптимизация воздействия вакуума на степень расширения зернового экструдата // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 158-165. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-158-165

Modeling and improvement of the vacuum effect on the expansion ratio of grain extrudate

A. A. Kurochkin✉, **D. I. Frolov**

Penza State Technological University

440039, Penza, Baidukova drive / Gagarin str., 1a/11

✉ anatolii_kuro@mail.ru

Abstract. This study investigated the influence of vacuum processing parameters – pressure (10–50 kPa) and exposure time (0–10 s) – on the expansion coefficient of a starch grain extrudate. The authors used an experimental setup, based on a modernized EK-40 extruder with an integrated vacuum chamber, and a physical model obtained using the COMSOL Multiphysics software package. This model takes into account gas transport through a porous medium (Darcy's law), viscoelastic deformation of the solid framework and geometric expansion of the product. It was found that the maximum expansion coefficient (2.8–2.9) is achieved at a pressure of 10 kPa and an exposure time of 1.1–1.2 s. When the pressure decreases below 8–10 kPa, a saturation effect is observed, caused by mechanical limitations of the starch framework. Appropriate exposure time corresponding to 95% of maximum expansion the extrudate velocity is 1.0–1.1 s and depends weakly on the vacuum level. The model has been verified experimentally: the deviation between the calculated and measured values does not exceed 4%. The results enable improvement of thermal vacuum extrusion modes and form the basis for digital design of similar processes in feed preparation and food production technologies.

Keywords: extruder, thermal vacuum extrusion, modeling, expansion coefficient, numerical simulation, vacuum.

For citation: Kurochkin A. A., Frolov D. I. Modeling and improvement of the vacuum effect on the expansion ratio of grain extrudate // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 158-165 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-158-165

Введение

В последние годы процессы экструзии сельскохозяйственного сырья стали одной из ключевых составляющих технологий в кормоприготовлении и производстве пищевых продуктов [1]. В процессе

экструдирования сырьё подвергается значительным деформациям сдвига, высоким температурам и давлениям, что приводит к смешению компонентов, желатинизации крахмала, денатурации белков и ряду других физико-химических преобразований,

определяющих свойства конечного продукта [2, 3]. Особый интерес представляют расширенные зерновые экструдаты, которые широко применяют при производстве кормов для животных, а также завтраков, снеков и других функциональных продуктов для людей [4]. Коэффициент расширения таких продуктов при экструзии является важнейшим показателем качества, так как он определяет пористость, хрусткость и усвояемость материала [5].

Традиционный способ достижения рационального расширения сырья в процессе обработки основан на резком снижении давления при выходе его из фильеры матрицы машины [6, 7]. Однако этот метод требует строгого контроля температуры и влажности сырья, что ограничивает технологические возможности экструзии [8, 9]. Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование термовакуумного эффекта [10]. При снижении давления в вакуумной камере, установленной на выходе сырья из фильеры, происходит интенсивное испарение влаги, что обеспечивает формирование развитой пористой структуры при относительно мягких температурных условиях [11]. На рисунке 1 представлена модель экспериментальной установки: термовакуумный экструдер на базе модернизированного одношнекового экструдера ЭК-40 с интегрированной вакуумной камерой, разработанной авторами.

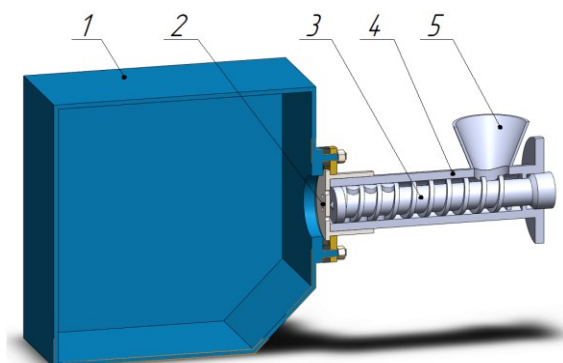


Рис. 1. Схема одношнекового экструдера с вакуумной камерой: 1 – вакуумная камера; 2 – матрица; 3 – шнек; 4 – корпус; 5 – горловина

Несмотря на очевидные преимущества вакуумного способа, количественное понимание влияния уровня вакуума и времени его воздействия на коэффициент расширения (КР) экструдатов остаётся недостаточно изученным. Большинство исследований посвящено эмпирическим зависимостям КР от состава смеси или параметров экструдера и не рассматривает вакуум как независимый параметр с точки зрения механики порозластичной деформации и транспорта газов [12, 13, 14, 15, 16].

Цель работы заключается в разработке и верификации мультифизической модели расширения зерновых экструдатов при контролируемом вакууме, а также в установлении количественных зависимостей между коэффициентом расширения, уровнем вакуума и временем воздействия.

Задачей исследования являлся численный анализ процесса расширения экструдата с вариацией уровня вакуума в камере и времени воздействия, проведенный на платформе COMSOL Multiphysics, и сравнение результатов исследований с экспериментальными данными, полученными на собственной установке.

Материалы и методы

1) Экспериментальная установка и материалы

В исследованиях использовали зерновой экструдат на основе пшеничного крахмала с начальной влажностью 16...18 %. Экспериментальные исследования по экструзии проводили на модернизированном одношнековом экструдере ЭК-40 производительностью 40 кг/ч, оснащённом вакуумной камерой, установленной непосредственно на выходе фильеры (рис. 2).



Рис. 2. Модернизированный одношнековый экструдер ЭК-40 с вакуумной камерой

Вакуумная камера представляет собой герметичный цилиндрический корпус из нержавеющей стали диаметром 300 мм и длиной 400 мм, оснащённый регулируемым клапаном для точного поддержания заданного уровня давления (5...50 кПа); системой управления временем экспозиции (0,5...10 с) с помощью пневматического затвора на выходе.

Давление в камере контролировали с помощью цифрового вакуумметра с погрешностью измерений $\pm 0,5$ кПа. Экструдат после вакуумной обработки охлаждали до комнатной температуры и хранили в герметичной упаковке до анализа.

2) Определение коэффициента расширения

Коэффициент расширения КР рассчитывали как отношение объёма экструдата после обработки $V_{ЭКСТР}$ к объёму V_0 , соответствующему сечению фильеры:

$$КР = \frac{V_{ЭКСТР}}{V_0} = \frac{m / \rho_{нас}}{\pi r_f^2 L}, \quad (1)$$

где m – масса образца, кг; $\rho_{нас}$ – насыпная плотность экструдата, измеренная методом объёмного

вытеснения (по ГОСТу 31819-2012), кг/м³; r_f – радиус фильеры, м; L – длина отрезка экструдата, м.

Измерения проводили в трёхкратной повторности. Погрешность определения КР не превышала $\pm 3\%$.

3) Численное моделирование

Численное моделирование процесса расширения экструдата под действием вакуума выполнено в программном пакете COMSOL Multiphysics 6.2 с использованием связанных физических интерфейсов: Darcy’s Law – для описания транспорта газа (воздуха и пара) через пористую структуру; Solid Mechanics – для моделирования вязкоупругой деформации твёрдого каркаса крахмала; Deformed Geometry – для учёта геометрического расширения.

Геометрическая модель представляла собой осесимметричный цилиндр диаметром 5 мм и длиной 10 мм, соответствующий сечению экструдата на выходе из фильеры.

Начальные условия: поровое давление в экструдате – атмосферное $p_0 = 101325$ Па; температура – 105 °С; давление насыщенного пара $p_{sat} = 120$ кПа.

Граничные условия: на внешней поверхности – мгновенное снижение давления до заданного уровня вакуума (10...50 кПа); на оси симметрии – условия симметрии (рис. 3).

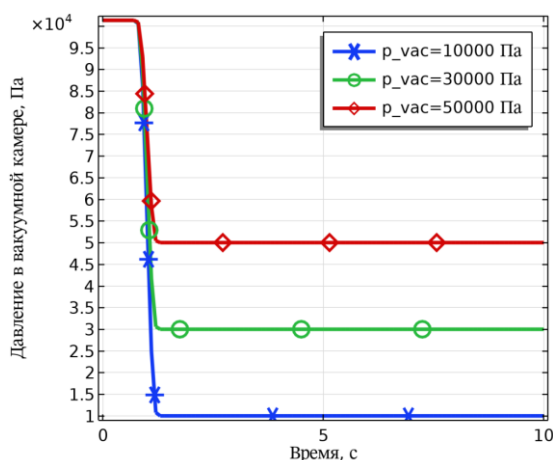


Рис. 3. Зависимость давления в вакуумной камере от времени

Материал экструдата задавали как пористую вязкоупругую среду со следующими свойствами: плотность – 1300 кг/м³; модуль упругости – 1 МПа; коэффициент Пуассона – 0,35; пористость $\epsilon = 0,6$; проницаемость $k = 5 \cdot 10^{-11}$ м², динамическая вязкость $\mu = 1 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Коэффициент расширения в модели определяли как отношение текущего объёма тела вращения к начальному.

Параметрический анализ проводили по двум факторам: давление вакуума $p_{vac} = 10, 30, 50$ кПа; время экспозиции t – от 0 с до 10 с.

Сетка конечных элементов состояла из 492 треугольных элементов, а относительная погрешность решения не превышала 1 %.

Для описания транспорта газа через пористую среду используют закон Дарси с возможным источником (от испарения влаги):

$$\nabla \cdot \left(-\frac{\epsilon k}{\mu} \nabla p \right) + Q = 0' \tag{2}$$

где ϵ – пористость; k – проницаемость пористой среды, м²; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; p – поровое давление, Па; Q – объёмный источник газа, с⁻¹ (при моделировании испарения $Q = k_{evap} (p_{sat} - p)$ при $p < p_{sat}$).

Общее напряжённое состояние в вязкоупругом материале выражают через эффективное напряжение:

$$\sigma = C : \epsilon - \alpha p \mathbf{I}, \tag{3}$$

где σ – тензор напряжений, Па; C – тензор упругих модулей, Па; ϵ – тензор малых деформаций; α – коэффициент (для открытых пор $\alpha \approx 1$); p – поровое давление, Па; \mathbf{I} – единичный тензор.

Для вязкоупругого поведения (стандартная линейная модель) модуль упругости

$$E(t) = E_{\infty} + E_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right), \tag{4}$$

где E_{∞} – равновесный модуль упругости, Па; E_1 – модуль релаксации, Па; τ_1 – время релаксации, с.

Геометрическое расширение моделируется путём деформации сетки, которая следует за перемещением материала. Узловые координаты сетки определяют как:

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} + \mathbf{d}, \tag{5}$$

где \mathbf{X} – исходные (лагранжевы) координаты, м; $\mathbf{d} = (d_r, d_z)$ – вектор перемещения сетки, м.

В осесимметричной постановке компоненты перемещения задаются на основе решения механики: $d_r = u_r$, $d_z = u_z$. Где u_r и u_z – радиальная и осевая компоненты перемещения из решения задачи Solid Mechanics.

Результаты

Анализ поля эквивалентных напряжений по критерию фон Мизеса (σ_{vM} , Па) позволил оценить механическую нагрузку, испытываемую твёрдым каркасом крахмала в процессе расширения под действием вакуума. На рисунке 4 представлено пространственное распределение σ_{vM} в поперечном сечении экструдата через 0,1 с после начала вакуумирования при давлении 10 кПа. Видно, что максимальные напряжения сосредоточены в поверхностных слоях и в зонах перехода от центральной части к периферии, где наблюдается наибольший градиент деформации. Это согласуется с физикой процесса: внешние слои материала первыми подвергаются растягивающим усилиям из-за быстрого снижения давления на границе,

в то время как центральная часть остаётся относительно сжатой до тех пор, пока газ не успеет выйти из глубинных пор.

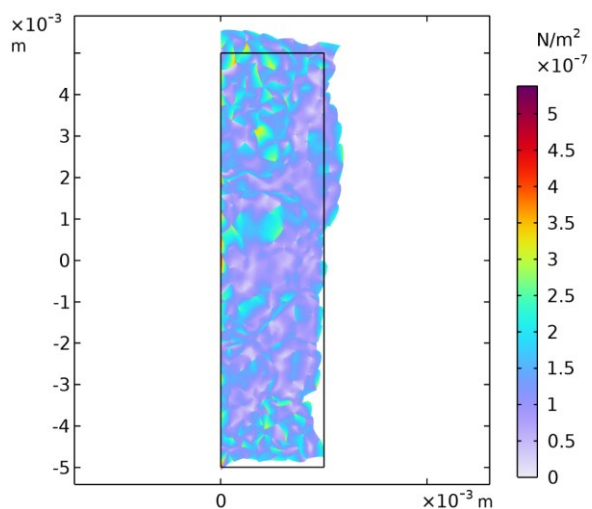


Рис. 4. Поле эквивалентных напряжений по критерию фон Мизеса

Максимальные напряжения в начальный момент времени (0,1...0,2 с) достигают 0,2...0,5 МПа, что существенно ниже предела прочности крахмальных пен (обычно 5...15 МПа), что объясняет стабильность структуры без разрушения во время расширения. При этом напряжения имеют выраженный осесимметричный характер, что соответствует равномерному радиальному расширению экструдата. С течением времени (до 4...5 с) поле напряжений становится более однородным, поскольку давление выравнивается по объёму, а материал переходит в состояние упругопластического равновесия.

Такое распределение напряжений подтверждает важность учёта вязкоупругих свойств материала в модели: именно способность к временной деформации и релаксации позволяет материалу «расправиться» без разрушения, обеспечивая высокий коэффициент расширения. Полученные данные также могут быть использованы для прогнозирования локальных зон потенциального разрушения при чрезмерном вакуумировании или неравномерной геометрии фильеры.

Форма и степень расширения зернового экструдата, полученного в эксперименте, имеют высокую степень соответствия этим параметрам, предсказанным численной моделью при фиксированном режиме вакуумной обработки (давление 10 кПа, время экспозиции 4 с).

Визуально форма расширенного экструдата, включая характерную бочкообразную геометрию и однородность поверхности, совпадает как в физическом образце, так и в образце, полученном в результате моделирования. Количественно коэффициент расширения составил $2,7 \pm 0,2$ в эксперименте и $2,8 \pm 0,2$ в модели (относительное отклонение менее 3...4 %). Такое хорошее согласие подтверждает, что разработанная мультифизическая модель адекватно

описывает ключевые процессы – транспорт газа через пористую структуру, вязкоупругую деформацию крахмального каркаса и геометрическое расширение материала под действием вакуума.

На рисунке 5 представлены зависимости коэффициента расширения экструдата от времени воздействия вакуума при постоянном давлении в камере (10, 30 и 50 кПа). Анализ кривых показывает, что во всех режимах наблюдается характерная динамика: быстрый рост коэффициента расширения в первые 1...2 с после начала вакуумирования, сопровождающийся интенсивным выходом газа из пористой структуры, за которым следует постепенное замедление темпов расширения и выход на плато, свидетельствующее о выравнивании порового давления по объёму материала. Максимальный коэффициент расширения достигается при времени экспозиции 4...5 с, после чего дальнейшее увеличение времени не приводит к значимому росту КР.

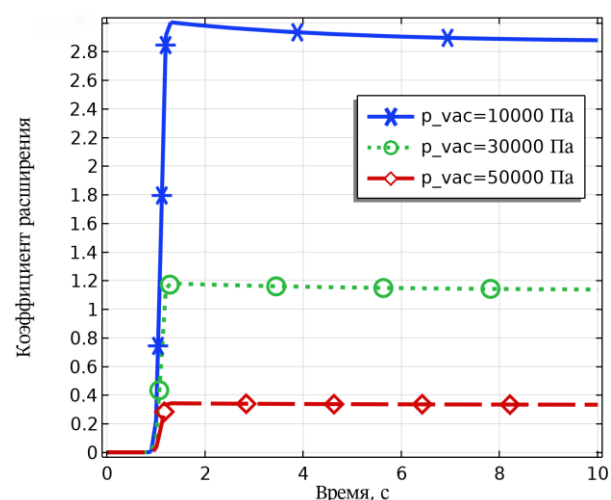


Рис. 5. Зависимости коэффициента расширения экструдата от времени воздействия вакуума при постоянном давлении в камере (10, 30 и 50 кПа)

Оптимальное время воздействия вакуума определено как момент достижения 95 % от максимального значения коэффициента расширения. Для давления 10 кПа это время составляет 1,1 с, для 30 кПа и 50 кПа – 1,0 с. Такая тенденция обусловлена ускорением процесса выравнивания давления при более высоком вакууме: чем ниже абсолютное давление в камере, тем интенсивнее градиент давления на границе, и тем быстрее газ покидает материал.

Данные численного моделирования, отражающие пространственно-временную эволюцию порового давления, подтверждают этот механизм: фронт снижения давления распространяется от поверхности к центру экструдата, а скорость снижения давления зависит от разницы между внешним вакуумом и начальным давлением внутри пор. Таким образом, оптимальное время экспозиции является компромиссом между полнотой расширения и производительностью процесса. Несмотря на различия в величинах приложенного вакуума, время достижения

установившегося значения коэффициента расширения оказывается почти одинаковым (около 1 с) для всех исследованных давлений. Это связано с тем, что ограничивающим фактором процесса расширения является скорость выхода газа из внутренних замкнутых пор, а перепад давления как таковой.

На рисунке 6 представлена зависимость максимального коэффициента расширения КР от абсолютного давления в вакуумной камере при различном времени экспозиции. Анализ данных показывает чёткую нелинейную зависимость: с уменьшением давления вакуума от 50 кПа до 10 кПа КР возрастает – от 0 до 2,8. Это объясняется увеличением движущей силы процесса – перепада давления между внутренним поровым пространством экструдата и внешней средой, что способствует более интенсивному выходу газа и формированию развитой пористой структуры.

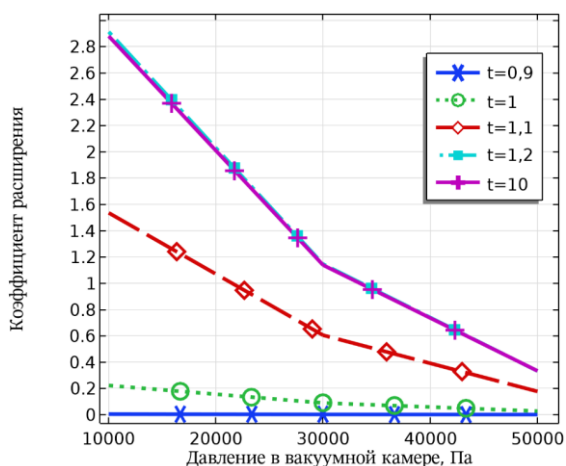


Рис. 6. Зависимость максимального коэффициента расширения КР от давления в вакуумной камере

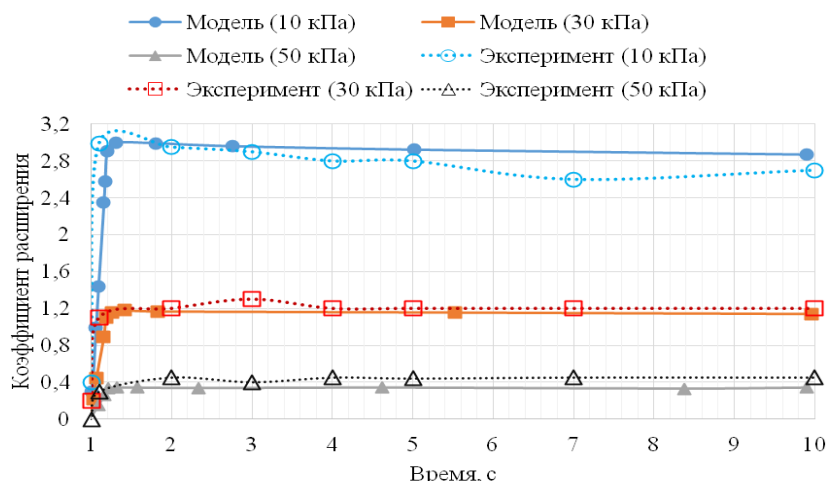


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и теоретических данных коэффициента расширения экструдата от времени вакуума при разных давлениях в вакуумной камере

Полученные результаты демонстрируют, что вакуумная обработка на выходе из фильеры является эффективным инструментом управления структурой и степенью расширения зернового экструдата.

Максимальный коэффициент расширения наблюдается при давлении 10 кПа и времени экспозиции 1,1...1,2 с. Однако при дальнейшем снижении давления ниже 8...10 кПа наблюдается явление насыщения: дальнейшее понижение давления практически не приводит к увеличению КР. Такая закономерность обусловлена тем, что при давлении ниже 8 кПа разница между давлением насыщенного пара воды (при 105 °С – около 120 кПа) и внешним давлением становится настолько большой, что испарение влаги происходит почти мгновенно, а структурная прочность крахмального каркаса начинает ограничивать возможность его дальнейшего расширения. Таким образом, снижение давления ниже 8...10 кПа является технологически неэффективным, поскольку не даёт существенного прироста качества продукта, но требует дополнительных энергетических затрат.

Полученные численные результаты подтверждены экспериментальными данными, полученными на модернизированном одношнековом экструдере с вакуумной камерой (рис. 7).

Выявленное оптимальное время экспозиции (1,1...1,2 с) в зависимости от давления) имеет важное практическое значение. С одной стороны, за малое время не достигается максимальное расширение; с другой – чрезмерно длительная обработка не только неэффективна, но и может привести к охлаждению продукта и снижению качества текстуры. Оптимальный режим ($p_{vac} = 10$ кПа, $t = 1,1...1,2$ с) позволяет достичь максимального коэффициента расширения (~2,8) при минимальных энергозатратах, что особенно актуально при масштабировании технологии.

Эти данные дополняют и уточняют ранее опубликованные эмпирические зависимости, которые, как правило, ограничиваются диапазоном атмосферного давления или слабого вакуума и не учитывают динамику процесса [17, 18].

Обсуждение

Сравнение полученных данных с литературными источниками подтверждает общую тенденцию роста коэффициента расширения при снижении давления в диапазоне 10...50 кПа [1, 2]. Однако многие авторы ограничиваются этим диапазоном и не исследуют область глубокого вакуума (<10 кПа), где мы выявили эффект насыщения расширения. В отличие от традиционного объяснения лимита расширения исчерпанием влаги для парообразования, наша модель показывает, что при давлении ниже 8...10 кПа расширение ограничивается механической устойчивостью формирующегося крахмального каркаса. Расчётные максимальные напряжения (0,2...0,5 МПа) остаются в 10...30 раз ниже предела прочности крахмальных пен (5...15 МПа) [17, 18], что обеспечивает структурную целостность, но одновременно определяет физический предел расширения.

Определение оптимального времени экспозиции (1,1...1,2 с для достижения 95 % максимального расширения) дополняет преимущественно статические подходы к описанию вспенивания [19], вводя кинетический аспект, критически важный для промышленной реализации. Разработанная модель демонстрирует высокую прогностическую способность. Ключевое преимущество подхода – количественная связь внешних технологических параметров (давление, время) с внутренними физическими полями (поровое давление, напряжения в каркасе) при сохранении расчётной эффективности за счёт отказа от избыточной детализации (например, моделирования роста отдельных пузырьков).

Практическая значимость режима 10 кПа / 1,1...1,2 с подтверждается сравнением с экспериментальными данными, полученными на модернизированном одношнековом экструдере с вакуумной камерой [11]. Предложенный режим обеспечивает коэффициент расширения 2,8...2,9 при минимизации энергозатрат на вакуумирование без риска разрушения структуры обрабатываемого продукта.

Заключение

Коэффициент расширения экструдата возрастает с уменьшением давления в вакуумной камере, однако при значениях ниже 8...10 кПа наблюдается эффект насыщения, обусловленный ограничением по механическим свойствам твёрдого каркаса материала. Оптимальное время воздействия вакуума, обеспечивающее достижение 95 % от максимального расширения экструдата, составляет 1,1...1,2 с в зависимости от давления.

Разработанная численная модель, учитывающая связь порового давления, вязкоупругой деформации и геометрического расширения, хорошо согласуется с экспериментальными данными (отклонение менее

4 %), что подтверждает её прогностическую способность. На основе комплексного анализа предложены технологически эффективные режимы вакуумной обработки: давление 10 кПа при времени экспозиции 1,1...1,2 с, позволяющем достичь максимального коэффициента расширения 2,8...2,9 без избыточных энергозатрат.

Полученные результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение, так как раскрывают физические механизмы вакуумного вспенивания экструдатов и предоставляют инженерные рекомендации для оптимизации процессов производства вспененных кормовых и пищевых продуктов на основе зернового сырья.

Литература

1. Аксенова О. И., Алексеев Г. В., Маслова К. С. Основные тенденции развития экструзионной техники и технологии // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Бийск, 22–24 мая 2019 г.). Бийск: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2019. С. 589-592.
2. 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.
3. Шариков А. Ю., Степанов В. И., Иванов В. В. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 3 (30). С. 447-460.
4. Фролов Д. И., Курочкин А. А., Потапов М. А. Влияние термовакуумной экструзии на физические и физико-химические свойства получаемого продукта // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4. С. 37-46.
5. Влияние дозировки клетчатки топинамбура, продукта комплексной технологии спирта, на изменение свойств рисовых экструдатов / М. В. Амелякина, В. А. Федотов, Н. В. Короткова и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85. № 4. С. 20-27.
6. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking // Food and Bioprocess Technology. 2009. Vol. 2. No. 2. P. 186-193.
7. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. Melt growth and shrinkage at the exit of the die in the extrusion-cooking process // Journal of Food Engineering. 2003. Vol. 60. No. 2. P. 185-192.
8. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // Critical reviews in food science and nutrition. 2019. Vol. 59. No. 18. С. 2979-2998.
9. Rokey G. J., Plattner B., Souza E. M. Feed extrusion process description // Revista Brasileira de Zootecnia. 2010. Т. 39. С. 510-518.

10. Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д. И. Фролов, А. А. Курочкин, П. К. Гарькина и др. // *Нива Поволжья*. 2019. № 2 (51). С. 134-143.

11. 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. Т. 640. № 7. С. 072018.

12. Аксенова О. И. Эмпирическое исследование кинетических зависимостей экструдирования рыбо-растительной смеси для производства расширенных картофельных снеков // *Ползуновский вестник*. 2018. № 3. С. 3-9.

13. Математическое обеспечение процесса экструдирования аномально-вязких сред методами планирования эксперимента / В. Н. Василенко, М. В. Копылов, А. А. Дерканосова и др. // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018. Т. 80. № 3 (77). С. 37-42.

14. Курочкин А. А., Фролов Д. И. Влияние размерных характеристик матрицы экструдера на свойства получаемого экструдата // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. Т. 7. № 1. С. 28–37.

15. 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.

16. Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review / M. S. Alam, J. Kaur, H. Khaira, et al. // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2016. Vol. 56. No. 3. С. 445-473.

17. Modeling of starchy melts expansion by extrusion / M. Kristiawan, G. Della Valle, V. K. Kansou et al. // *Trends in food science & technology*. 2016. Vol. 48. P. 13-26.

18. Kristiawan M., Della Valle G. Transport phenomena and material changes during extrusion // *Extrusion cooking*. Woodhead Publishing, 2020. P. 179-204.

19. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack / X. Meng, M. Threinen, M. Hansen et al. // *Food Research International*. 2010. Т. 43. No. 2. С. 650-658.

References

1. Aksenova, O. I., Alekseev, G. V., Maslova, K. S. "Main Trends in the Development of Extrusion Equipment and Technology" // "Technologies and Equipment for the Chemical, Biotechnological, and Food Industries: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists with International Participation" (Biysk, May 22–24, 2019). Biysk: Altai State Technical University named after I. I. Polzunov, 2019. pp. 589–592.

2. Bakhchevnikov, O. N., Braginet, S. V. "Extrusion of Plant-Based Food Raw Materials (Review)" // "Food Production Equipment and Technology." 2020. Vol. 50, No. 4. P. 690–706.

3. Sharikov A. Yu., Stepanov V. I., Ivanov V. V. Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes // *Bulletin of universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2019. Vol. 9. No. 3 (30). P. 447-460.

4. Frolov D. I., Kurochkin A. A., Potapov M. A. Influence of thermal vacuum extrusion on the physical and physicochemical properties of the resulting product // *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy*. 2024. No. 4. P. 37-46.

5. Influence of the dosage of Jerusalem artichoke fiber, a product of complex alcohol technology, on the change in the properties of rice extrudates / M. V. Amelyakina, V. A. Fedotov, N. V. Korotkova, et al. // *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2023. Т. 85. No. 4. P. 20-27.

6. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking // *Food and Bioprocess Technology*. 2009. Vol. 2.No. 2. P. 186-193.

7. Arhaliass A., Bouvier J. M., Legrand J. Melt growth and shrinkage at the exit of the die in the extrusion-cooking process // *Journal of Food Engineering*. 2003. Vol. 60.No. 2. P. 185-192.

8. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2019. Vol. 59. No. 18. P. 2979-2998.

9. Rokey G. J., Plattner B., Souza E. M. Feed extrusion process description // *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2010. Vol. 39. P. 510-518.

10. Improving the efficiency of extrudate dewatering in the vacuum chamber of a modernized extruder / D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, P. K. Garkina, et al. // *Niva Povolzhya*. 2019. No. 2 (51). P. 134-143.

11. 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. No. 7. P. 072018.

12. Aksenova O. I. Empirical study of the kinetic dependencies of extrusion of a fish-vegetable mixture for the production of expanded potato snacks // *Polzunovsky Vestnik*. 2018. No. 3. P. 3-9.

13. Mathematical support for the process of extrusion of anomalously viscous media using experimental design methods / V. N. Vasilenko, M. V. Kopylov, A. A. Derkanosova, et al. // *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018. Vol. 80. No. 3 (77). P. 37-42.

14. Kurochkin A. A., Frolov D. I. Influence of the dimensional characteristics of the extruder die on the properties of the resulting extrudate // *Bulletin of the Samara State Agricultural Academy*. 2022. Vol. 7. No. 1. P. 28–37.

15. 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. Vol. 5. No. 4. P. 42–48.

16. Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review / M. S. Alam, J. Kaur, H. Khaira, et al. // Critical reviews in food science and nutrition. 2016. Vol. 56.No. 3. P. 445-473.

17. Modeling of starchy melts expansion by extrusion / M. Kristiawan, G. Della Valle, V. K. Kansou et al. // Trends in food science & technology. 2016. Vol. 48. P. 13-26.

18. Kristiawan M., Della Valle G. Transport phenomena and material changes during extrusion // Extrusion cooking. Woodhead Publishing, 2020. P. 179-204.

19. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack / X. Meng, M. Threinen, M. Hansen et al. // Food Research International. 2010. T. 43. No. 2. P. 650-658.