

Разработка математической модели экструзии зернового белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья на шнековом пресс-экструдере

Д.В. Мартынова, аспирантка, В.П. Попов, к.т.н., С.Ю. Соловых, к.т.н., С.В. Кишкилёв, аспирант, ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ; В.А. Шахов, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

В последнее время шнековые пресс-экструдеры всё чаще применяются для производства кормов и кормовых добавок. Однако данный вид оборудования отличается высокой энергоёмкостью,

ресурсозатратностью, а готовый кормовой продукт не всегда отличается высоким качеством [1].

Основными компонентами сырья, из которого изготавливают кормовые продукты, являются белки, клетчатка и крахмал. В процессе экструзионной обработки белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья происходят значительные структурно-механические и химические изменения перерабатываемого материала [2].

Установлено, что функциональные свойства экструзионных продуктов зависят от параметров процесса – производительности экструдера, угловой скорости шнеков и их геометрии, размеров структурирующих фильер, температуры проведения процесса, влажности экструдированного сырья, его химического и гранулометрического состава [3].

Анализ физико-химических процессов, происходящих при экструзии белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья, показывает, что такие рекомендуемые величины параметров, как влажность и максимальная температура экструдированного сырья, после их определения на основе методов оптимизации можно непосредственно перенести с лабораторного на промышленный экструдер. С другой стороны, такие рекомендуемые величины, как диаметр фильеры, степень сжатия и угловая скорость шнека, перенести с лабораторного на промышленный экструдер сложно, так как это влечёт значительные изменения параметров процесса. Это свидетельствует о необходимости математического моделирования процесса экструзии [4].

Интенсивная разработка математических моделей процесса экструзии началась за рубежом и в бывшем СССР после работ Д.Ф. Карлея, Р.А. Штруба, Р.С. Маллока, Д.М. Мак-Келви, К. Джексона и др. [5].

Наиболее точно реальную физическую картину процесса экструзии отражают реологические модели. Сложность описания поведения прессуемого материала при экструдировании в одношнековых прессах заключается в изменении его свойств во время прессования [6].

Особенности реологических моделей материалов растительного и животного происхождения были рассмотрены в работах Н.Б. Урьева и М.А. Талейсника, Ю.А. Мачихина и С.А. Мачихина, А.В. Гор-

батова. Математические модели, посвящённые изменениям реологических свойств белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья в процессе экструзии, представлены в работах Т.М. Зубковой и В.П. Ханина [7].

Проведённый анализ теорий процесса экструдирования показывает, что они направлены на определение основных технико-экономических параметров. В большинстве приведённых моделей материал рассматривается как упруго-вязко-пластичное тело, вместе с тем сырьё поступает в экструдер в сыпучем состоянии. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс преобразования сыпучего материала в упруго-вязко-пластичный недостаточно изучен. Математические модели не учитывают структурно-механических преобразований, происходящих в экструдированном материале [8].

Цель исследования – разработать математическую модель, которая позволяет учитывать структурно-механические преобразования в перерабатываемом материале в процессе его превращения от сыпучего до упруго-вязкого.

Материал и методы исследования. С целью разработки математической модели процесса экструзии, позволяющей учитывать структурно-механические преобразования в перерабатываемом материале в процессе его превращения от сыпучего до упруго-вязкого, лабораторная установка шнекового пресс-экструдера была условно разделена на три зоны: зона загрузки, зона плавления и зона дозирования (рис.) [9].

На расстоянии 0,08, 0,3 и 0,6 м от загрузочного устройства 1 установлены измерительные устройства для измерения крутящих моментов в конце каждой зоны, состоящие из цилиндрической насадки 6, гибкого элемента 8 и наклеенных с двух сторон тензодатчиков 7 [10].

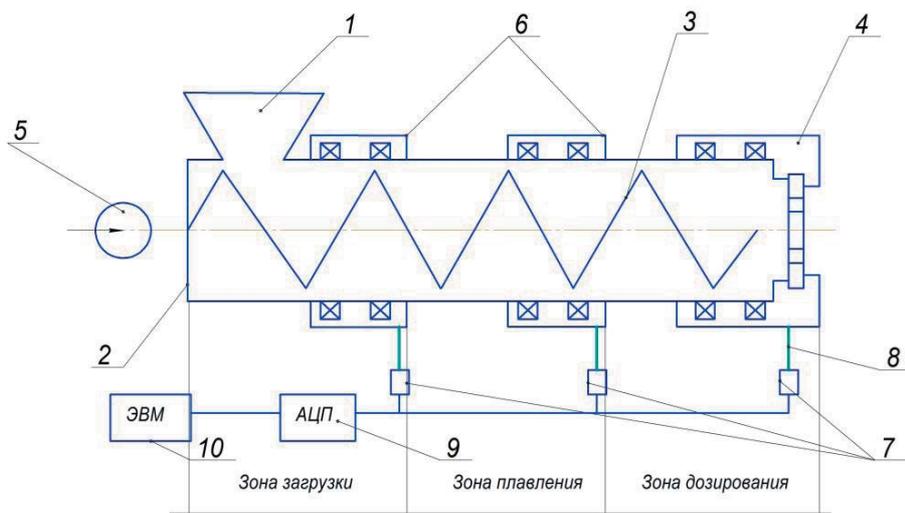


Рис. – Схема лабораторной установки:

1 – загрузочное устройство; 2 – корпус пресса; 3 – шнек; 4 – формирующая головка; 5 – привод прессующего шнека; 6 – цилиндрическая насадка для измерения крутящего момента; 7 – тензодатчик; 8 – гибкий элемент, на который с двух сторон наклеиваются тензодатчики; 9 – аналого-цифровой преобразователь; 10 – компьютер; 11 – датчики для измерения температуры

В зоне загрузки из-за неполного заполнения межвинтового канала шнека перерабатываемым материалом никаких преобразований в материале не происходит. Измерительное устройство, расположенное на расстоянии 0,08 м от загрузочного устройства 1, позволяет судить по величине крутящего момента в конце зоны загрузки о виде перерабатываемого материала с точки зрения его структурно-механических свойств. При полном заполнении межвинтового канала шнека перерабатываемым материалом происходит переход от зоны загрузки в зону плавления.

В зоне плавления материал ведёт себя как сыпучее тело. По мере его разогревания частицы сыпучего тела всё более выраженно контактируют между собой. При этом наблюдается их истирание и увеличение адгезионных свойств. Измерительное устройство, расположенное на расстоянии 0,3 м от загрузочного устройства 1, позволяет судить по величине крутящего момента в зоне загрузки о степени расплавленности материала. В конце зоны плавления происходит превращение перерабатываемого материала в упруго-вязкое однородное тело.

В зоне дозирования материал ведёт себя как упруго-вязкое тело. Измерительное устройство, расположенное в районе формирующей головки 4 на расстоянии 0,6 м от загрузочного устройства 1, позволяет судить по величине крутящего момента в зоне загрузки о плотности продукта на выходе из экструдера и, как следствие, о качестве вырабатываемой продукции.

Сигналы, поступающие от устройств для измерения крутящего момента, регистрируются на аналого-цифровом преобразователе 9 и затем передаются в компьютер 10, где преобразуются в численные значения измеряемой величины [6].

Результаты исследования. При составлении математической модели процесс экструзии был разбит на два этапа: пластификация материала и его дозирование.

Для каждого этапа разработана математическая модель. В связи с тем что в зоне загрузки практически никаких преобразований в перерабатываемом материале не наблюдается и энергозатраты близки к 0, составление математической модели для этой зоны не имеет смысла.

При разработке математической модели, описывающей пластификацию материала, с учётом того, что материал ведёт себя как сыпучее тело, за основу были взяты предположения Дарнелла и Мола: отдельные твёрдые частицы ведут себя подобно сплошной среде и по сути представляют собой твёрдую пробку, находящуюся в контакте со всей стенкой межвинтового канала.

При этом Дарнеллом и Молом было получено уравнение профиля давления в межвинтовом канале, которое записывается следующим образом:

$$P(x) = P_0 \exp \left[\left(f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \frac{x}{H} \right], \quad (1)$$

$$\text{где } a = \tan(\theta + \phi) = \frac{v_b \sin \phi}{v_b \cos \phi - v_{sx}};$$

- ϕ – угол наклона витков шнека;
- θ – угол, определяющий направление движения твёрдого материала;
- v_b – скорость цилиндра;
- v_{sx} – скорость твёрдого слоя;
- P_0 – давление при $x = 0$;
- x – расстояние от загрузочного устройства до измерительного элемента;
- f_s – динамический коэффициент трения на поверхности шнека;
- f_b – динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра;
- W – расстояние между витками шнека;
- H – глубина канала.

Согласно законам теоретической механики крутящий момент в каждом поперечном сечении можно определить по формуле:

$$M_x = \frac{\pi}{8 \cdot \cos^2 \phi} (D_d + D_s) \cdot (D_d^2 - D_s^2) \cdot P_x, \quad (2)$$

- где ϕ – угол наклона витков шнека;
- D_d – наружный диаметр шнека;
- D_s – внутренний диаметр шнека.

Преобразуя формулы (1) и (2), получим расчётный суммарный крутящий момент в конце зоны плавления:

$$M_{na} = \frac{\pi \cdot P_0 \cdot (D_d + D_s) \cdot (D_d^2 - D_s^2) / 8 \cdot \cos^2 \phi}{\left[\left(f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \cdot \frac{1}{H} \right]} \cdot \exp \left[\left(f_b \frac{1 - af_s}{(a^2 + 1)^{1/2}} - f_s \frac{W - 2H}{W} \right) \cdot \frac{x}{H} \right]. \quad (3)$$

При разработке математической модели, описывающей зону дозирования, с учётом того, что в этой зоне перерабатываемый материал ведёт себя как упруго-вязкое тело, движение белково-клетчатко-крахмалосодержащего материала наиболее полно описывается реологической моделью Максвелла. Реологическое уравнение Максвелла имеет вид:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta}, \quad (4)$$

- где G – модуль упругости;
- η – вязкость;
- $\dot{\tau}$ – скорость изменения касательного напряжения.

Учитывая уравнения, полученные Т.М. Зубковой для нормальных и касательных напряжений, действующих на материал в прессующем механизме, было выведено уравнение для расчёта крутящего момента в зоне дозирования:

$$M_s = \frac{\omega_s' \cdot r_w \cdot \cos \alpha \cdot (G - 0,5\eta \cdot h_s) + h_s}{2,5 \cdot h_s (G - 0,5\eta \cdot h_s - \eta)} 2\pi x_1 R^2, \quad (5)$$

где $R = \frac{1}{2}(D_{1к} + D_s)$,

$D_{1к}$ – внутренний диаметр корпуса;

x_1 – расстояние от начала зоны плавления до измерительного элемента.

Если определение крутящего момента M_n в конце зон производить при помощи устройств для измерения крутящих моментов, тогда M_n определяется формулой:

$$M_n = \tau \cdot 2\pi \cdot L_1 \cdot R_1^2, \quad (6)$$

где L_1 – длина зазора между шнеком и внутренним диаметром насадки;

R_1 – расстояние до зазора.

С учётом уравнения Максвелла получаем измеряемый крутящий момент в каждой зоне:

$$M_n = (\dot{\gamma} \cdot \eta) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma_t}{\eta}}\right) \cdot 2\pi L_1 \cdot R_1^2. \quad (7)$$

На основании сравнения измеряемых и расчётных крутящих моментов можно управлять процессом экструзии.

Выводы. Составлена математическая модель процесса экструзии белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья с учётом зон шнековой камеры пресс-экструдера: зоны плавления и дозирования. Полученная математическая модель позволяет учитывать структурно-механические преобразования в перерабатываемом материале в процессе его превращения от сыпучего до упруго-вязкого. Получено уравнение для измеряемого крутящего момента, определяемого с помощью специальных устройств. Сравнивая расчётные и измеряемые крутящие моменты, можно управлять процессом экструзии и получать готовый продукт высокого качества при минимальных затратах энергии.

Литература

1. Мартынова Д.В. Исследование влияния экструдированного кормового продукта на продуктивность крупного рогатого скота / Д.В. Мартынова, В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6 (62). С. 88–90.
2. Тимофеева Д.В. Разработка технологии экструдированных продуктов с учётом адгезионно-когезионных технологий / Д.В. Тимофеева, В.П. Попов, Н.В. Белов, А.Г. Белова, Е.В. Ганин // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сб. ст. Всерос. науч.-практич. конф. / МНИЦ ПГСХА. Пенза: РИО ПГСХА, 2013. С. 75–177.
3. Тимофеева Д.В. Оптимизация процесса преобразования агрегатного состояния зернового сырья при экструзионной обработке / Д.В. Тимофеева, В.Г. Коротков, В.П. Попов, С.В. Антимонов // Хлебопродукты. 2013. № 8. С. 46–48.
4. Тимофеева Д.В. Исследование процесса преобразования сыпучего материала в упруго-вязко-пластичный в канале шнека пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов // Бьелские исследования: матер. IX междунар. науч.-практич. конф. Т. 25. Сельско-стопанство. Ветеринарная наука. София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. С. 50–54.
5. Тимофеева Д.В. Исследование преобразования структурно-механических свойств и химического состава белково-крахмало-клетчаткосодержащего сырья в канале одношнекового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, С.В. Кишкелёв, В.П. Попов, Н.Н. Мартынов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. Всерос. науч.-методич. конф. (с междунар. участием) / Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ООО «ИПК «Университет», 2015. С. 1007–1014.
6. Попов В.П. Технология получения экструдированных кормов с применением гречишной и подсолнечной лузги / В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых, С.В. Кишкелёв // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 4. С. 47–49.
7. Мартынова Д.В. Оптимизация процесса экструдирования белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 3. С. 151–156.
8. Тимофеева Д.В. Обоснование оптимальных параметров экструдирования различных видов сырья в канале одношнекового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. Всерос. науч.-методич. конф. / Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ООО «ИПК «Университет», 2014. С. 1298–1305.
9. Мартынова Д.В. Модернизация шнекового пресс-экструдера / Д.В. Мартынова, В.П. Попов, А.Г. Зинюхина, Н.Н. Мартынов, В.П. Ханин // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. № 4. С. 104–108.
10. Тимофеева Д.В. Модернизация рабочего органа типового одношнекового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.Г. Коротков, В.П. Попов, С.В. Антимонов // Хлебопродукты. 2014. № 10. С. 50–52.