

Устройство для определения динамического коэффициента трения в канале шнека пресс-экструдера при производстве кормовых продуктов

Д.В. Мартынова, к.т.н., В.П. Попов, к.т.н., С.Ю. Соловых, к.т.н., Е.В. Волошин, к.т.н., С.В. Антимонов, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ

Производство кормов – одна из первых отраслей перерабатывающей промышленности, в которой стали активно применять метод экструзионной обработки.

Экструзионные технологии являются одним из наиболее перспективных способов обработки материалов растительного происхождения. В настоящее время экструдеры широко применяются в производстве кормов и кормовых добавок, в частности для обработки зернового сырья (пшеница, ячмень, кукуруза, горох, рожь, бобы, соя и т.д.) [1]. Широкое распространение обработки материалов растительного происхождения методом экструзии можно объяснить тем, что экструдеры могут совмещать в себе ряд операций, выполняя их непрерывно и очень быстро (нагревать, стерилизовать, перемешивать, практически одновременно формовать, составлять композиции из нескольких компонентов, сжимать, варить) [2].

Чтобы соответствовать современным технологиям, пресс-экструдеры должны отвечать ряду требований, одними из которых являются: высокая производительность, низкая энергоёмкость и высокое качество вырабатываемой продукции. Для экструдирования кормов используются в основном одношнековые пресс-экструдеры. В ходе анализа литературных источников было установлено, что производительность, энергоёмкость одношнековых пресс-экструдеров и качество вырабатываемой продукции обусловлены параметрами технологического процесса, а также параметрами основного рабочего органа – шнека [3, 8].

В начале движения в шнековой камере перерабатываемый материал, используемый для приготовления кормов, имеет твёрдо-сыпучие свойства. Первый всесторонний анализ движения твёрдого материала в одношнековых экструдерах был проведён Дарнеллом и Молом в 1956 г. Позже многие исследователи развили работы Дарнелла и Мола, однако основа анализа осталась неизменной. Основным методом анализа движения материала состоит в рассмотрении элемента твёрдой пробки в канале шнека и определении всех сил, которые действуют на него. Определяющие силы – это силы трения на границах и силы, возникающие вследствие градиентов давления в твёрдом слое [4].

Дарнеллом и Молом было получено уравнение профиля давления в межвинтовом канале:

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

где $\alpha = \tan(\theta + \varphi)$;

f_b – динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра;

f_s – динамический коэффициент трения на поверхности шнека;

H – глубина канала;

W – расстояние между витками шнека;

θ – угол, определяющий направление движения твёрдого материала;

x – расстояние от загрузочного устройства.

Из уравнения (1) видно, что профиль давления в межвинтовом канале определяется параметрами шнека пресс-экструдера и параметрами технологического процесса экструдирования, которые в свою очередь имеют непосредственную взаимосвязь с динамическим коэффициентом трения сырья о поверхность шнека (f_b) и динамическим коэффициентом трения сырья о поверхность цилиндра (f_s) пресс-экструдера [5].

В настоящее время возможность измерения динамического коэффициента трения непосредственно в экструдере отсутствует. Поэтому на кафедре прикладной биотехнологии Оренбургского государственного университета было решено разработать устройство для определения динамического коэффициента трения сыпучих материалов, используемых для приготовления кормовых продуктов, при установившемся сдвиге.

Цель исследования – разработка устройства для определения динамического коэффициента трения сыпучих материалов.

Материал и методы исследования. Данное устройство разработано на базе устройства для определения адгезионных и когезионных напряжений, возникающих в процессе сжатия и растяжения исследуемых материалов. В основу устройства для измерения динамического коэффициента трения заложен прибор, описанный Раутенбахом и Гольдакером [6, 9, 10], предназначенный для измерения внутреннего трения сыпучих материалов при установившемся сдвиге. Устройство для измерения динамического коэффициента трения представлено на рисунке.

Устройство представляет собой измерительный механизм 11, включающий верхнюю, нижнюю пластину и ограничители, между которыми помещается сыпучий продукт. Оно снабжено механизмом нагружения, выполненным в виде пассивного захвата 1, в котором закрепляется нижняя пластина измерительного механизма и активного захвата 2, в котором закрепляется верхняя пластина

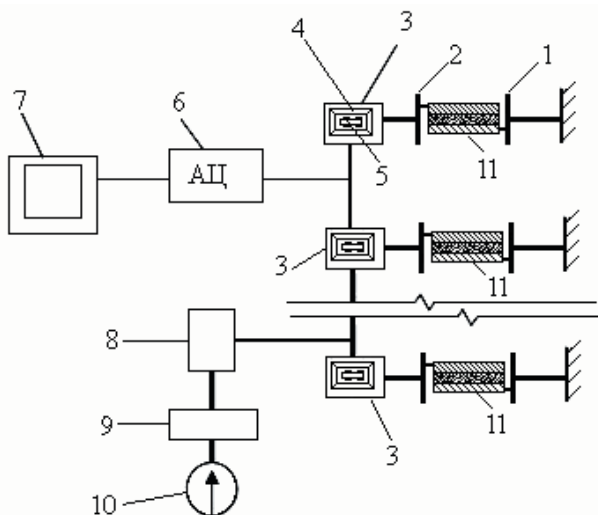


Рис. – Устройство для определения динамического коэффициента трения:

- 1 – пассивный захват; 2 – активный захват; 3 – нагрузитель; 4 – металлическая пластина; 5 – тензометрические датчики; 6 – АЦП; 7 – компьютер;
- 8 – редуктор; 9 – вариатор; 10 – электродвигатель; 11 – измерительный механизм

измерительного механизма, силоизмерительным механизмом и соединённым с активным захватом 2 нагрузителем 3.

Механизм нагружения соединён с силоизмерительным механизмом, который выполнен в виде тонкой металлической пластины 4 с двумя тензодатчиками 5, наклеенными с противоположных сторон. Тензодатчики соединены через аналого-цифровой преобразователь 6 с компьютером 7, а нагрузитель 3 в свою очередь состоит из редуктора 8, вариатора 9 и электродвигателя 10 [7].

Устройство работает следующим образом. Нижняя пластина измерительного механизма 11 закрепляется в пассивном захвате 1, верхняя пластина в активном захвате 2 механизма нагружения. В результате работы системы, состоящей из редуктора 8, электродвигателя 10 и вариатора 9, нагрузитель 3 приводит в движение активный захват 2, сообщая ему равномерную нагрузку. Активный захват 2 при этом приводит в движение верхнюю пластину измерительного механизма 11. Получаемый от тензодатчиков 5 сигнал, регистрируясь на аналого-цифровом преобразователе 6, передаётся в компьютер 7, где происходит его преобразование в численные значения измеряемой величины. Возвращается активный захват 2 в исходное положение посредством движения нагрузителя в обратном направлении.

Применение нагрузителя, содержащего редуктор, вариатор и электродвигатель, обеспечивает равномерное перемещение пластины измерительного механизма, позволяя с наибольшей точностью провести измерения динамического коэффициента трения сыпучих материалов при установившемся сдвиге.

Использование в предлагаемом устройстве тензометрии и компьютерной обработки сигналов

позволяет применять его для автоматизированного контроля и регулирования технологического процесса.

При проведении экспериментальных исследований в качестве исходного сырья использовали зерновую смесь, соответствующую требованиям ГОСТа 9268-2015 «Комбикорма-концентраты для крупного рогатого скота», в составе: пшеница – 10%, отвечающая требованиям ГОСТа Р 54078-2010 «Пшеница кормовая. Технические условия»; овёс – 19%, отвечающий требованиям ГОСТа Р 53901-2010 «Овёс кормовой. Технические условия»; ячмень кормовой – 70%, отвечающий требованиям ГОСТа Р 53900-2010 «Ячмень кормовой. Технические условия»; соль поваренная – 1%, отвечающая требованиям ГОСТа Р 51574-2000 «Соль поваренная пищевая. Технические условия».

Для наиболее точного определения динамического коэффициента трения было решено из исходной зерновой смеси составить три вида смесей с разным процентным соотношением компонентов:

- пшеница – 10%, овёс – 70%, ячмень – 19%, соль – 1%;
- пшеница – 10%, овёс – 19%, ячмень – 70%, соль – 1%;
- пшеница – 70%, овёс – 19%, ячмень – 10%, соль – 1%.

В устройстве для определения динамического коэффициента трения создавались условия, аналогичные условиям в экструдере. В работе использовались методы оптимизации на основе математического планирования экспериментов, апробированные при определении динамического коэффициента трения при экструдировании на поверхности шнека и на поверхности цилиндра.

Результаты исследования. С целью определения динамических коэффициентов трения была проведена серия экспериментов. В качестве параметров, влияющих на динамические коэффициенты трения, были выбраны: скорость движения твёрдого материала ($v_{тв.м.}$), давление (P) и температура сырья на входе в экструдер (t). После серии экспериментальных исследований был разработан план полного факторного эксперимента ПФЭ²³ с включением ключевых точек с целью получения уравнений второго порядка. В разработанном плане значения исследованных факторов представлены в условных единицах. В таблице 1 представлены

1. Значения исследованных факторов

Скорость движения твёрдого материала			
Условные единицы, $v_{тв.м.}$	-1	0	1
Натуральные значения, $v_{тв.м.}'$, м/с	1,4	0,89	0,26
Давление в конце зоны загрузки			
Условные единицы, Р	-1	0	1
Натуральные значения, Р', кПа	111,7	109,8	106,8
Температура сырья на входе в экструдер			
Условные единицы, t	-1	0	1
Натуральные значения, t', °С	20	40	60

2. Результаты эксперимента

№ опыта	Динамический коэффициент трения, f_b		
	повторность		
	№ 1	№ 2	№ 3
1	0,32	0,325	0,33
2	0,27	0,28	0,285
3	0,325	0,33	0,315
4	0,274	0,275	0,271
5	0,358	0,351	0,357
6	0,28	0,34	0,32
7	0,342	0,36	0,354
8	0,311	0,306	0,298
9	0,307	0,304	0,2965
10	0,307	0,305	0,295
11	0,315	0,31	0,33
12	0,273	0,28	0,29
13	0,273	0,305	0,29
14	0,2875	0,315	0,329
15	0,22	0,3	0,29

ключевые точки плана эксперимента в натуральных значениях и условных единицах.

Для обеспечения требуемой точности все опыты проводились в трёх повторностях. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Динамический коэффициент трения на поверхности шнека рассчитывается по формуле:

$$f_b = f_s \cdot k_1, \quad (2)$$

где f_s – динамический коэффициент трения на поверхности цилиндра;

k_1 – коэффициент, зависящий от материала шнека и цилиндра.

Для наиболее распространённого случая принимаем $k_1=1$, отсюда следует, что $f_b=f_s$.

По результатам исследований было получено уравнение регрессии зависимости динамического коэффициента трения f_b от скорости движения твёрдого материала, давления и температуры сырья на входе в экструдер:

$$f_b = 0,307 - 0,021 \cdot P - 0,014 \cdot t - 0,0002 \cdot v_{тв.м} \cdot P \cdot t + 0,0138 \cdot v_{тв.м}^2 + 0,0119 \cdot P^2 + 0,0121 \cdot t^2, \quad (3)$$

где $v_{тв.м}$, P , t – скорость движения твёрдого материала, давление и температура сырья на входе в экструдер представлены в условных единицах.

Для перевода натуральных величин в условные единицы приведены уравнения:

$$\begin{aligned} v_{тв.м} &= 2,5 \cdot v'_{тв.м} - 2, \\ P &= -0,4223 \cdot P' + 1,5764, \\ t &= 0,05 \cdot t' - 2. \end{aligned} \quad (4)$$

Величины со штрихом натуральные.

Полученные уравнения позволяют определить динамический коэффициент трения перерабатываемого материала, как о поверхность шнека (f_b), так и о поверхность цилиндра (f_s) пресс-экструдера. Так как производительность, энергоёмкость экструдера

и качество производимой продукции зависят от технологических параметров процесса экструзии и параметров рабочего органа, которые имеют непосредственную взаимосвязь с динамическим коэффициентом трения (согласно формуле (1)), то, зная величину динамических коэффициентов трения (на основании формул (2) и (3)), можно контролировать и регулировать технологический процесс экструдирования, получая высококачественные кормовые продукты при минимальных затратах энергии на производство.

Выводы. Разработано автоматизированное устройство для определения динамического коэффициента трения сыпучих материалов, используемых для приготовления экструдированных кормовых продуктов. На основании исследований, проведённых на разработанном устройстве, получены уравнения, позволяющие определить зависимость динамического коэффициента трения перерабатываемого материала о поверхность шнека (f_b), и поверхность цилиндра (f_s) пресс-экструдера от параметров технологического процесса, а также контролировать и регулировать процесс экструдирования, получая высококачественные кормовые продукты при минимальных затратах энергии на производство.

Литература

1. Попов В.П. Получение оптимальных режимов при экструдировании белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья / В.П. Попов, Н.Н. Мартынов, Д.В. Мартынова, А.В. Быков // Инновации и наукоёмкие технологии в образовании и экономике: матер. VI Междунар. науч.-практич. конф. Уфа, 2017. С. 234–237.
2. Мартынова Д.В. Разработка математической модели экструзии зернового белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья на шнековом пресс-экструдере / Д.В. Мартынова, В.П. Попов, С.Ю. Соловых, С.В. Кишкилёв, В.А. Шахов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 1 (63). С. 64–67.
3. Тимофеева Д.В. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера / Д.В. Тимофеева, В.П. Попов, С.В. Антимонов, А.Г. Зинюхина // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 9 (170). С. 220–225.
4. Раувендааль К. Экструзия полимеров / пер. с англ. А.Я. Малкина. 4-е изд. СПб.: Профессия, 2008. 768 с.
5. Соловых С.Ю., Энерго-ресурсосберегающие технологии в линии по производству кормов и кормовых добавок / С.Ю. Соловых, Е.В. Ганин, С.В. Антимонов, С.В. Кишкилёв // Наука и образование в современном обществе: вектор развития: сб. науч. трудов по матер. Междунар. науч.-практич. конф. М.: ООО «Ар-Консалт», 2014. С. 107–109.
6. Немец И. Практическое применение тензорезисторов / пер. с чешск. М.: Энергия, 1970. 144 с.
7. Мартынова Д.В., Мартынов Н.Н., Попов В.П. Исследование зависимости динамического коэффициента трения от исходных факторов при экструдировании зернового сырья // Молодёжь как импульс в техническом прогрессе: матер. IV междунар. науч.-исследоват. конф. молодых учёных, аспирантов, студентов и старшеклассников. Самара – Оренбург: СамГУПС, 2016. С. 208–211.
8. Klenk P. Plastifiziermodelle für die verarbeitung benetzender und nichtbenetzender thermoplaste auf einschnecken extrudern // Rheologica Ada. 1968. № 7. Pp. 75–78.
9. Goldacker E., Rautenbach R. By supplying the powder to the theory of the pressure in the extruder // Chemie Ind. Techn. 1972. № 44. Pp. 405–410.
10. Rautenbach, R., Goldacker E. Zur optimalen gestaltung der einzugszone von einschneckenextrudern / Kunststoffe, Muenchen. 1971. № 61. Pp. 104–107.