

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭКСТРУДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Оптимизация параметров шнековых прессов и технологического процесса экструдирования невозможна без знания реологических характеристик обрабатываемого комбикорма в зависимости от температуры, влажности и скорости сдвига. Для определения указанных свойств перерабатываемого сырья в ходе процесса экструдирования необходимо вести контроль температуры в зоне формирующей головки и замерять давление в нескольких сечениях по длине фильеры. Предложенная методика позволяет проводить указанные измерения при помощи термометра сопротивления, тензодатчиков, наклеенных на наружную поверхность фильеры, и аналого-цифрового преобразователя.

В процессе экструдирования прессуемый материал проявляет в канале фильеры свойства псевдопластического тела, движение которого может быть описано реологическим степенным уравнением Оствальда – де Виля

$$\tau = \mu' \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига на боковой цилиндрической поверхности материала, МПа;  
 $\mu'$  – коэффициент консистенции материала, пропорциональный вязкости, Па·с<sup>n</sup>;  
 $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига на рассматриваемой боковой поверхности выделенного объема материала, с<sup>-1</sup>;  
 $n$  – индекс течения.

Числовые значения индексов течения  $n$  и коэффициентов консистенции  $\mu'$  для различных рецептов комбикормов неизвестны. В связи с этим для экспериментального определения реологических характеристик кормового сырья растительного происхождения в процессе экструдирования на кафедре МАХПП ОГУ разработана установка, основанная на использовании фильеры пресс-экструдера в качестве капиллярного вискозиметра, работающая совместно с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) LC-212F.

Модуль LC-212F предназначен для работы с датчиками сопротивления, собранными по мостовой схеме. Данные с термометра сопротивления и тензодатчиков поступают на АЦП, преобразуются в цифровой сигнал, который программа обработки данных выдает на экране ЭВМ в графическом (для наглядности) и табличном (для дальнейшей обработки) виде.

В работах [1] и [2] проводились измерения внутреннего давления материала на наружной поверхности шнекового корпуса и фильеры пресс-экструдера методом тензометрических исследований. Измерения выполнялись при помощи тензометрического усилителя 8АНЧ-7М, шлейфового осциллографа Н-155 и гальвано-

метра серии М 001.2. Тарировка показаний системы тензодатчиков производилась с помощью пресса для испытания механических свойств материалов. В указанных работах проводили сравнение осциллограмм разности нормальных напряжений в окружном направлении и нормальных осевых напряжений в любом поперечном сечении корпуса шнекового прессующего механизма или фильеры в процессе эксплуатации пресса с той же разностью в процессе тарировки, что дает возможность определить нормальное напряжение в прессуемом материале в данном поперечном сечении прессующего механизма.

Отрицательным моментом проведенных исследований является недостаточная чувствительность используемого оборудования, его непрактичность, характеризующая невозможностью подключения к ЭВМ, и моральное устаревание.

Применение аналого-цифрового преобразователя LC-212F исключает указанные недостатки. Кроме того, предоставляется возможность автоматизации процесса экструдирования, что в свою очередь позволяет повысить качество экструдата и снизить удельные материальные и энергетические затраты.

**Методика измерения давления в экструдиром материале в фильере пресс-экструдера с помощью АЦП LC-212F** заключается в следующем.

Рассмотрим любое произвольное сечение фильеры пресс-экструдера, в котором необходимо определить давление в прессуемом материале.

Деформации на наружной поверхности фильеры пропорциональны нормальному давлению на ее внутреннюю поверхность.

Внутреннее давление можно измерить при помощи двух тензодатчиков, наклеенных на внешней поверхности фильеры так, что их измерительные оси взаимно перпендикулярны и проходят через выбранную точку поперечного сечения фильеры.

Направление измерительной оси одного тензодатчика параллельно оси фильеры, а направление оси второго тензодатчика совпадает с окружным направлением наружной поверхности фильеры в соответствии с рисунком 1.

Если полагать фильеру толстостенным цилиндром, то нормальные напряжения в нем, вызванные давлением экструдированного материала, будут составлять [3]:

$$\sigma_{zH} = P \frac{k^2}{1-k^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_{tH} = P \frac{2k^2}{1-k^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – давление в экструдированном материале;  $k = r/R$  – отношение соответственно радиусов внутренней  $r$  и наружной  $R$  цилиндрических поверхностей фильеры;  $\sigma_{zH}$  – напряжение на наружной поверхности фильеры вдоль оси;  $\sigma_{tH}$  – напряжение на наружной поверхности фильеры в окружном направлении.

Тангенциальная и осевая деформации на наружной поверхности фильеры в данном сечении, вызванные экструдированным материалом:

$$\varepsilon_{tH} = \frac{1}{E} [\sigma_{tH} - \nu \sigma_{zH}], \quad (4)$$

$$\varepsilon_{zH} = \frac{1}{E} [\sigma_{zH} - \nu \sigma_{tH}], \quad (5)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала корпуса;  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\nu = 0,3$ .

Кроме того, на эти деформации накладываются термические деформации фильеры, получающей тепло от разогретого прессуемого материала:  $\varepsilon_{zT}, \varepsilon_{tT}$  – относительные деформации фильеры при нагреве, соответственно в осевом и окружном направлении.

Полагая корпус изотропным по отношению к передаче тепла и коэффициенту линейного расширения по выбранным осям измерения, будем считать относительную деформацию при нагреве одинаковой в обоих направлениях измерения ( $\varepsilon_{zT} = \varepsilon_{tT} = \varepsilon_T$ ).

Между изменением сопротивления тензодатчика и относительной деформацией, которая вызвала его, существует простая зависимость [4]

$$\frac{\Delta R}{R} = S\varepsilon, \quad (6)$$

где  $\frac{\Delta R}{R}$  – относительное изменение сопротивления тензодатчика;  $S$  – чувствительность тензодатчика к деформации.

Нижняя часть тензометрического моста состоит из двух проволочных сопротивлений постоянного номинала ( $R'_3 = R'_4 = R' = const$ ), которые не подвергаются воздействию температуры, а АЦП регистрирует падение напряжения, вызванное разбалансом моста вследствие изменения сопротивления тензодатчиков  $R'_1$  и  $R'_2$  [4]:

$$U_M = U_n \frac{R'_1 R'_3 - R'_2 R'_4}{(R'_1 + R'_2)(R'_3 + R'_4)}, \quad (7)$$

где  $U_M$  – показание АЦП, мВ;  $U_n$  – опорное напряжение (напряжение питания) мостовой схемы, мВ.

Величина сопротивлений тензодатчиков в процессе экструзии определяется по следующим выражениям:

$$R'_1 = R' + \Delta R'_1 = R' + \Delta R'_{z'} + \Delta R'_{t'} + \Delta R'_T, \quad (8)$$

$$R'_2 = R' + \Delta R'_2 = R' + \Delta R'_{z'} + \Delta R'_{t'} + \Delta R'_T, \quad (9)$$

где  $\Delta R'_{z'}, \Delta R'_{t'}$  – изменение сопротивления тензодатчика, вызванное осевой и тангенциальной деформацией соответственно;

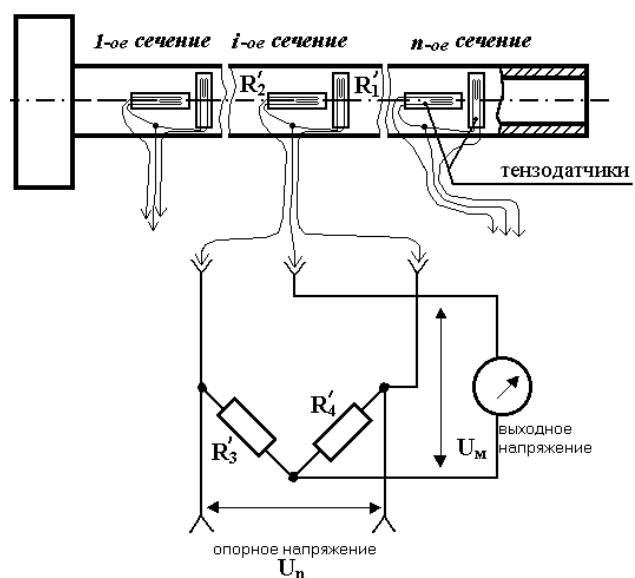


Рисунок 1. Схема расположения и соединения тензодатчиков

$\Delta R'_{zT}, \Delta R'_{iT}$  – изменение сопротивления тензодатчика вследствие линейного расширения фильеры при нагреве в осевом и тангенциальном направлении соответственно;  $\Delta R'_T$  – изменение сопротивления тензодатчика, вызванное изменением температуры.

Изменение сопротивления тензодатчика вследствие линейного расширения фильеры при нагреве [5]

$$\Delta R'_{zT} = \Delta R'_{iT} = R' \cdot S \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (10)$$

где  $\beta$  – коэффициент линейного расширения фильеры ( $\beta = 11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$\Delta T$  – изменение температуры фильеры вследствие нагрева экструдата,  $^\circ\text{C}$ .

Изменение сопротивления, вызванное изменением температуры [5]

$$\Delta R'_T = R' \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (11)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (для константана  $\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Подставляя значения  $R'_3, R'_4$  и  $R'_1, R'_2$ , определяемые из выражений (8), (9), используя зависимости (6), (10) и (11), в уравнение (7) после преобразований получим

$$U_M = -U_n \frac{SPk^2(1+\nu)}{4E \cdot (1-k^2) \cdot [1 + \frac{S}{2E} \cdot \frac{3Pk^2}{1-k^2} (1-\nu) + S\beta\Delta T + \alpha\Delta T]} \quad (12)$$

Влияние температуры на изменение сопротивления тензодатчиков хорошо компенсируется, так как членом в квадратных скобках можно пренебречь. При подстановке числовых значений величин составляющих указанный член знаменателя:  $S = 2 \dots 2,5$  – для тензодатчиков из константана;  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\nu = 0,3$ ;  $\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $P = 1 \dots 20$  МПа;  $\Delta T = 40 \dots 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $k = 0,88 \dots 0,5$ ;  $\beta = 11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – получим значение  $1,0057 \dots 1,0065$ . Следовательно, погрешность, которую мы вводим, пренебрегая указанным членом, будет составлять порядка 0,6%.

Преобразуя (12), получаем выражение для определения давления экструдированного материала в  $i_{-om}$  сечении фильеры по показаниям АЦП:

$$P_i = -4 \frac{U_{M_i} E (1-k^2)}{U_n S k^2 (1+\nu)} \quad (13)$$

**Методика определения температуры при помощи АЦП LC-212F** заключается в использовании мостовой схемы, в одно плечо которой включен термометр сопротивления (электрическая схема соединения представлена на рисунке 2).

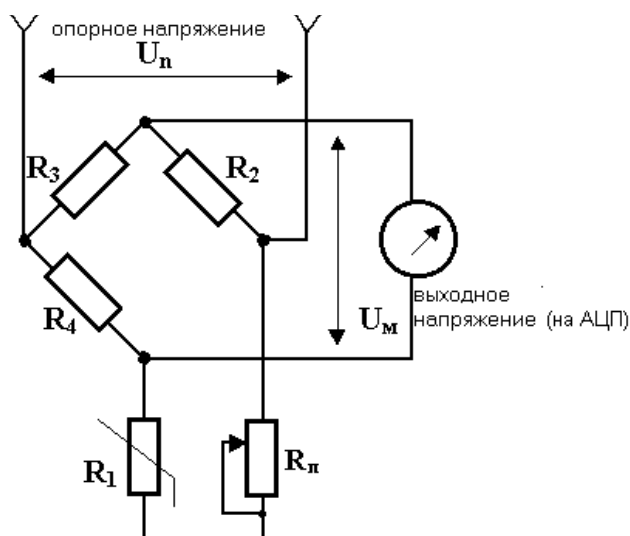


Рисунок 2. Электрическая схема соединения термометра сопротивления

Согласно рисунку 2 мостовая схема состоит из следующих элементов: проволочных сопротивлений постоянного номинала

$$R_2 = R_3 = R_4 = R = const,$$

подстроечного резистора  $R_{п}$ , термометра сопротивления  $R_1$ :

$$R_1 = R + \Delta R_T, \quad (14)$$

где  $\Delta R_T$  – изменение сопротивления, вызванное изменением температуры [5].

Из уравнения (11) следует

$$\Delta R_T = R \cdot \alpha (T_3 - T_0), \quad (15)$$

где  $T_0$  – начальная температура процесса экструдирования,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_3$  – текущая температура процесса экструдирования,  $^\circ\text{C}$ .

Подставляя значения  $R_1, R_2, R_3, R_4$  в уравнение (7) для определения падения напряжения, вызванного разбалансом моста, и преобразовывая его, получим выражение для определения температуры процесса экструдирования:

$$T_3 = \frac{4}{\alpha} \frac{U_M}{U_n - 2U_M} + T_0. \quad (16)$$

**Методика определения реологических характеристик комбикормов в процессе экструдирования.**

После выхода продукта из фильеры и наступления установившегося режима включают отметчик времени и собирают продукт с после-

дующим определением его массы и объема. Количество продукта, собранного за одно измерение, должно быть возможно большим для уменьшения ошибок. Одновременно с этим снимают показания с термометра сопротивления и тензодатчиков, наклеенных в двух сечениях фильеры.

Методика расчета реологических характеристик для каждой постоянной температуры при изменяющемся давлении сводится к следующим этапам [6,7]:

Определяют истинный перепад давления  $\Delta P$  (МПа) между двумя сечениями фильеры по показаниям АЦП, используя уравнение (13).

По перепаду давления определяют напряжение на стенке фильеры, МПа:

$$\tau_{cm} = \frac{D \cdot \Delta P}{4L}, \quad (17)$$

где  $L$  – расстояние между сечениями, в которых измеряется давление, м;

$D$  – внутренний диаметр фильеры, м.

Вычисляют градиент скорости,  $c^{-1}$ :

$$\dot{\gamma}_* = 8 \frac{4Q}{\pi \cdot D^3}, \quad (18)$$

где  $Q$  – объемный расход комбикорма через фильеру,  $m^3/c$ .

Обычно по полученным величинам  $\tau_{cm}$  и  $\dot{\gamma}_*$  строится график зависимости  $\ln \tau_{cm}$  от  $\ln \dot{\gamma}_*$  и по графику определяется показатель  $n$  степенного закона [7, 8].

Однако показатель  $n$  можно вычислить, используя метод наименьших квадратов по выражению:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^m (\ln \dot{\gamma}_i \cdot \ln \tau_{cm_i}) - \sum_{i=1}^m (\ln \dot{\gamma}_i) \cdot \sum_{i=1}^m (\ln \tau_{cm_i})}{m \cdot \sum_{i=1}^m (\ln \dot{\gamma}_i)^2 - (\sum_{i=1}^m \ln \dot{\gamma}_i)^2}, \quad (19)$$

где  $m$  – число экспериментальных точек.

Данный метод определяет высокую аппроксимацию данных, которая зависит от степени их разброса.

Затем определяют скорость сдвига у стенки фильеры при отсутствии проскальзывания по уравнению Рабиновича – Муни,  $c^{-1}$

$$\dot{\gamma}_{cm} = \dot{\gamma}_* \cdot \frac{3n+1}{4n}. \quad (20)$$

Из степенного закона (1) выражают коэффициент консистенции,  $MПа \cdot c^n$

$$\mu' = \tau_{cm} / \dot{\gamma}_{cm}^n. \quad (21)$$

Неньютоновские системы довольно плохо воспроизводят числовые значения свойств (нормальной считается ошибка  $\pm 10\%$ ).

Таким образом, используя изложенные методики и аналого-цифровой преобразователь LC-212F, можно вести контроль температуры в зоне формирующей головки и давления в любом сечении фильеры пресс-экструдера и по полученным данным определять реологические свойства перерабатываемого сырья в процессе экструдирования. Кроме того, высокая чувствительность модуля LC-212F и вывод данных на ЭВМ предоставляют возможность автоматизации процесса экструдирования, что в свою очередь позволяет повысить качество экструдата и снизить удельные материальные и энергетические затраты.

#### Список использованной литературы:

1. Ханин В.П. Ресурсосберегающий процесс экструзионной обработки зернового сырья. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Оренбург: ОГУ, 1999. – 22 с.
2. Сагитов Р.Ф. Исследование и оптимизация процесса экструдирования масличного сырья в шнековых прессах. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Оренбург: ОГУ, 2000. – 20 с.
3. Прочность, устойчивость, колебания. Т. 2. Расчет толстостенных цилиндров. Справочник в 3-х т. Под общ. ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 463 с.
4. Немец И. Практическое применение тензорезисторов. Пер. с чешск. – М.: Энергия, 1970. – 144 с.
5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов (Справочное руководство). – М.: Физматгиз, 1958. – 356 с.
6. Сагитов Р.Ф., Абдрафиков Р.Н. Методика определения коэффициента эффективной вязкости и напряжения сдвига на стенке канала шнекового пресса с методом проверки правильности результата. Вестник Оренбургского государственного университета. 1999, №2. – С. 92-95.
7. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник /Под ред. Ю.А. Мачихина. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
8. Технологические трубопроводы мяскокомбинатов. / А.В. Горбатов, Я.И. Виноградов, В.Д. Косой, А.А. Горбатов. – М.: Агропромиздат, 1989. – 304 с.