

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА НА СТЕНКЕ КАНАЛА ШНЕКОВОГО ПРЕССА С МЕТОДОМ ПРОВЕРКИ ПРАВИЛЬНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей статье предложены два метода получения реологических характеристик прессуемого материала растительного происхождения и метод проверки правильности результатов. Предложенные методики пригодны для определения, с использованием ЭВМ, реологических параметров материалов растительного происхождения в реальных условиях напряженно-деформированного состояния, возникающих при прессовании в шнековых прессах.

Для экспериментального определения реологических характеристик мелкозернистого корма растительного происхождения на кафедре МАПП ОГУ разработана установка, основанная на использовании моделей сменных фильер, которые при формообразовании цилиндрических гранул за счет изменения деформации внешней поверхности упругой цилиндрической оболочки системой тензодатчиков позволяют регистрировать нормальные напряжения в прессуемом материале σ_m . Канал сменной фильеры связан с системой координат, начало которой находится в плоскости выходного отверстия, а ось O_z совпадает с осью цилиндрического канала сменной фильеры. В разных плоскостях, перпендикулярных оси O_z , характеризуемых каждая одной координатой $z = C_i$, где $C_i = const$, а i – номер поперечного сечения канала, смонтированы системы парных тензодатчиков, измерительные оси которых взаимно перпендикулярны. Датчик, измерительная ось которого совпадает с направляющей окружностью внешней поверхности цилиндрического канала, регистрирует нормальное напряжение в радиальном сечении оболочки цилиндрического канала σ_{rk} , направление которых параллельно касательной плоскости к направляющей окружности. Второй датчик регистрирует деформации оболочки канала вдоль образующей внешней цилиндрической поверхности, вызванные напряжением σ_{zk} . Нормальные напряжения, регистрируемые каждой парой датчиков, будут [1]

$$(\sigma_{rk})_i = -(\sigma_m)_i \frac{2r^2}{R^2 - r^2} + \varepsilon_i E; \quad (1)$$

$$(\sigma_{zk})_i = \frac{P_i}{F} = -\frac{1}{2}(\sigma_m)_i \frac{r^2}{R^2 - r^2} + \varepsilon_i E; \quad (2)$$

где P_i – растягивающая сила в сечении плоскостью $z_i = const$;

F – площадь поперечного сечения оболочки канала той же плоскостью;

ε_i – относительная термическая дефор-

мация при температуре процесса;

E – модуль упругости оболочки канала;
 r – радиус внутренней поверхности канала сменной фильеры;

R – радиус наружной поверхности канала сменной фильеры.

Знак (-) перед первым членом в правой части уравнений (1) и (2) восстанавливает знак сжимающего напряжения σ_m .

Если каждую пару тензодатчиков соединить в измерительный полумост, можно определить $(\sigma_m)_i$ в каждом поперечном сечении $z_i = const$, где смонтирована пара тензодатчиков, с термокомпенсацией. Используя выражения (1) и (2), получим при измерении напряжений в прессуемом материале

$$[(\sigma_{rk})_i - (\sigma_{zk})_i]_{изм} = -\frac{3}{2}(\sigma_m)_i \frac{r^2}{R^2 - r^2}. \quad (3)$$

Тарировка показаний i -ой системы тензодатчиков производится с помощью прессы для испытания механических свойств материалов.

Нагрузку сменной модели фильеры на этом прессе выполняет сжимающее усилие P_i . Измеряемые тензодатчиками напряжения при этом будут

$$\sigma_{zk} = -\frac{P_i}{\pi(R^2 - r^2)}; \quad (4)$$

$$\sigma_{rk} = -\nu\sigma_{zk} = \frac{\nu P_i}{\pi(R^2 - r^2)}. \quad (5)$$

$$[(\sigma_{rk})_i - (\sigma_{zk})_i]_{изм} = \frac{(1 + \nu)P_i}{\pi(R^2 - r^2)}, \quad (6)$$

где ν – коэффициент поперечной деформации.

Обозначим

$$\lambda_{ki} = \frac{[(\sigma_{tk})_i - (\sigma_{zk})_i]_{M3M}}{[(\sigma_{tk})_i - (\sigma_{zk})_i]_{Mnp}}. \quad (7)$$

Тогда, используя выражения (3) и (6), получим

$$\lambda_{ki} = -\frac{3 \pi (\sigma_{.m})_i r^2}{2 (1 + \nu) P_i}$$

и после преобразований будем иметь

$$(\sigma_{.m})_i = -\frac{2 (1 + \nu) \lambda_{ki} P_i}{3 \pi r^2}. \quad (8)$$

Сравнение осциллограмм разности нормальных напряжений в окружном направлении и нормальных осевых напряжений в i -ом поперечном сечении цилиндрической оболочки сменной фильеры в процессе эксперимента с той же разностью в процессе тарировки дает возможность определить нормальное напряжение в прессуемом материале в каждом i -ом поперечном сечении канала сменной фильеры.

Мелкодисперсный материал растительного происхождения при различных способах экструзии ведет себя как реологическая система и может быть представлен разными математическими моделями. В процессе гранулирования комбикорма через кольцевые матрицы прессов-грануляторов нами была использована математическая модель вязкоупругого (упругопластического) тела [2]. Но для описания процесса экструзии в шнековых прессующих механизмах многие исследователи, например [3, 4], использовали в качестве модели прессуемого тела степенную жидкость. Для сопоставления результатов этих исследований требуется их воспроизведение в одинаковых условиях на подобных лабораторных установках. Для определения параметров упругопластического тела было использовано устройство, в котором исследовалось напряженное состояние материала, прессуемого в модели цилиндрического канала фильеры кольцевой матрицы пресса-гранулятора [5]. Поэтому для определения реологических свойств прессуемого материала растительного происхождения как степенной жидкости нами был использован капиллярный вискозиметр, рабочим элементом которого является модель цилиндрического канала фильеры, использовавшаяся для определения параметров прессуемого материала как упругопластического тела, а для создания давления был избран одношнековый прессующий механизм. Измерения и последующие вычисления были проведены по известной методике [6], преобразованной в аналитическую форму для удобства применения ЭВМ.

Предполагалось, что прессуемый материал

в канале обладает свойствами нелинейной степенной системы, для которой справедливо уравнение течения Гершеля-Балкли

$$\tau = \mu_1^* [\dot{\gamma}(\tau)]^n, \quad (9)$$

где τ - напряжение сдвига на боковой цилиндрической поверхности материала радиуса r ;

μ_1^* - коэффициент консистенции материала, пропорциональный вязкости, Па·с ^{n} ;

$\dot{\gamma}$ - скорость сдвига на рассматриваемой боковой поверхности выделенного объема материала с радиусом r .

Можно уравнение (9) привести к виду

$$\tau = \mu_0^* [\dot{\gamma}_*(\tau)]^{n-1} \dot{\gamma}(\tau) = \mu_{эф} \dot{\gamma}(\tau), \quad (10)$$

где

$$\mu_{эф} = \mu_0^* [\dot{\gamma}_*(\tau)]^{n-1} - \quad (11)$$

эффективная (переменная) вязкость, Па·с;

$n-1 = m_1$ - темп разрушения структуры, который меньше нуля для псевдопластических систем и больше нуля для дилатантных.

Логарифмируя уравнение (11), получим

$$\lg \mu_{эф} = \lg \mu_0^* + m_1 \lg [\dot{\gamma}_*(\tau)] \quad (12)$$

Вычисления проводятся для параметров, при которых проводилось экспериментальное исследование

$$\mu_{эф} = \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}(\tau_c)} = \frac{(\sigma_{.m})_i r \pi^3}{2z_i 4Q}; \quad (13)$$

$$\dot{\gamma}_* = \frac{4Q}{\dot{\gamma}_1 \pi r^3}; \quad (14)$$

где Q - объемный расход через модель фильеры;

r - диаметр цилиндрического канала модели фильеры;

$(\sigma_{.m})_i$ - нормальное осевое напряжение прессуемого материала в i -ом поперечном сечении канала сменной фильеры;

z_i - координата i -го поперечного сечения канала сменной фильеры.

Функциональная зависимость $\lg \mu_{эф}$ от $\lg [\dot{\gamma}_*(\tau)]$ графически выражается прямой, не проходящей через начало координат, с угловым коэффициентом m_1 . Эффективная вязкость μ_0^* (рис. 1) соответствует значению относительного градиента сдвига

$\dot{\gamma}_* = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} = I$, а $\dot{\gamma}_1$ имеет произвольное значение.

Угловым коэффициентом прямой соответствует темпу разрушения структуры m_1 , то есть

$$m_1 = \frac{\partial(\lg \mu_{эф})}{\partial[\lg \dot{\gamma}_*(\tau)]} = n - 1. \quad (15)$$

В обозначениях, принятых на рис. 1,

$$m_1 = \frac{(\lg \mu_{\text{эф}})_k - (\lg \mu_{\text{эф}})_1}{(\lg \dot{\gamma}^*)_k - (\lg \dot{\gamma}^*)_1}. \quad (16)$$

Таким образом определяют параметры $m_1, n, \dot{\gamma}_1, \mu_0^*, \mu_1^* = \mu_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n}$.

Будем полагать, что прямолинейность отрезка $[1; k]$ будет распространяться на его продолжение, по крайней мере, до пересечения с осью ординат (рис. 1), где это пересечение определит эффективную вязкость при $\lg \dot{\gamma}^* = 0$. Тогда коэффициент эффективной вязкости μ_0^* определяется из графика зависимости эффективной вязкости материала $\lg \mu_{\text{эф}}$ от относительной скорости сдвига $\lg \dot{\gamma}^*$ следующим выражением (рис. 1).

$$\lg \mu_0^* = \frac{(\lg \mu_{\text{эф}})_1 [(\lg \dot{\gamma}^*)_k - (\lg \dot{\gamma}^*)_1] - (\lg \dot{\gamma}^*)_1 [(\lg \mu_{\text{эф}})_k - (\lg \mu_{\text{эф}})_1]}{(\lg \dot{\gamma}^*)_k - (\lg \dot{\gamma}^*)_1}. \quad (17)$$

Эксперимент по определению эффективной вязкости $\lg \mu_{\text{эф}}$ обычно проводится для k точек логарифмической зависимости, отличающихся объемной производительностью Q давлением в сечении сменных моделей фильер, размерами каналов сменяемых моделей фильер. Для большей точности число таких точек выбирается $k \geq 3$. Прямая на графике логарифмической зависимости проходит через все эти точки. Полагаем, что она соединяет непосредственно 1-ю и k -ю точки. Тогда коэффициент эффективной вязкости материала μ_0^* можно определить зависимостью (17).

Для расчета этих же параметров можно использовать консистентные переменные:

$$\tau_c = \frac{d\sigma_{\text{н}}}{dz} \frac{r}{2} - \text{напряжение сдвига}; \quad (18)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi r^3} - \text{градиент скорости}. \quad (19)$$

Тогда основным уравнением будет

$$\frac{4Q}{\pi r^3} = \frac{4n}{3n+1} \dot{\gamma}_1 \left(\frac{\tau_c}{\mu_0^* \dot{\gamma}_1} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (20)$$

В общем случае давление по длине модели фильеры может изменяться нелинейно, тогда заменяя напряжение сдвига на стенке его значением (10) получим

$$\frac{4Q}{\pi r^3} = \frac{4n}{3n+1} \dot{\gamma}_1 \left[\frac{r}{2\mu_0^* \dot{\gamma}_1} \left(\frac{d\sigma_{\text{н}}}{dz} \right) \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (21)$$

где $\frac{d\sigma_{\text{н}}}{dz}$ градиент осевого нормального напряжения $\sigma_{\text{н}}$.

При равномерном распределении $\sigma_{\text{н}}$

вдоль оси канала

$$\frac{d\sigma_{\text{н}}}{dz} = \frac{\sigma_{\text{н}}}{z_i}; \quad (22)$$

Уравнение (20) можно преобразовать к виду

$$\tau_c = \mu_0^* \dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{4Q}{\dot{\gamma}_1 \pi r^3} \right)^n. \quad (23)$$

Обозначим $\mu_0^* \dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n = A_1$ напряжением

на стенке цилиндрического канала модели фильеры при единичном значении относительного среднего градиента скорости, Па;

$$\frac{4Q_c}{\dot{\gamma}_1 \pi r^3} = \dot{\gamma}^* - \text{относительный градиент скорости}$$

на стенке цилиндрического канала фильеры (консистентная переменная). Тогда уравнение (23) упрощается:

$$\tau_c = A_1 \dot{\gamma}^n. \quad (24)$$

Также как и в предыдущем случае будем полагать, что прямолинейность отрезка $[1; k]$ будет распространяться на его продолжение, по крайней мере, до пересечения с осью ординат (рис. 2), которое определит напряжение сдвига на стенке канала A_1 при относительной скорости сдвига, удовлетворяющей условию $\lg \dot{\gamma}^* = 0$. Зная консистентные переменные, отложив экспериментальные точки и проведя прямую линию (рис. 2), легко определить A_1 [Па] из уравнения

$$\lg A_1 = \frac{(\lg \tau)_1 [(\lg \dot{\gamma}^*)_k - (\lg \dot{\gamma}^*)_1] - (\lg \dot{\gamma}^*)_1 [(\lg \tau)_k - (\lg \tau)_1]}{(\lg \dot{\gamma}^*)_k - (\lg \dot{\gamma}^*)_1}; \quad (25)$$

$$n = \frac{d \left(\lg \frac{\sigma_{\text{н}} r}{2z_i} \right)}{d \left(\lg \frac{4Q}{\dot{\gamma} \pi r^3} \right)}. \quad (26)$$

В обозначениях, принятых на рис. 2,

$$n = \frac{(\lg \tau)_k - (\lg \tau)_1}{(\lg \dot{\gamma}^*)_k - (\lg \dot{\gamma}^*)_1}. \quad (27)$$

Далее можно вычислить вязкость по формуле

$$\mu_0^* = A_1 \dot{\gamma}_1^{-1} f_1(n), \quad (28)$$

где $f_1(n) = \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n$. (29)

Уравнение (23) можно представить как на-

пряжение сдвига на стенке в зависимости от истинного градиента скорости

$$\dot{\gamma}_{*уст} = \frac{3n+1}{4n} \frac{4Q}{\dot{\gamma}_1 \pi r^3}, \quad (30)$$

то есть в виде

$$\tau_c = (\mu_0^* \dot{\gamma}_1)^n \dot{\gamma}_{*уст}^n. \quad (31)$$

Индекс течения в дифференциальном уравнении течения и консистентных переменных, если в логарифмических шкалах получается прямая линия, одинаков.

Вывод

Предложены два метода получения реологических характеристик экструдруемого материала растительного происхождения и метод проверки правильности результатов. Предложенные методики пригодны для определения, с использованием ЭВМ, реологических параметров материалов растительного происхождения в реальных условиях напряженно-деформированного состояния, возникающих при прессовании в шнековых прессах.

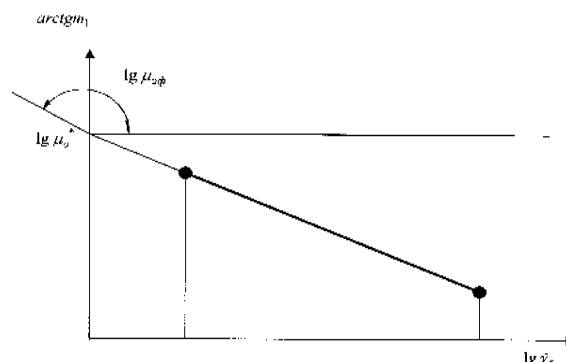


Рис. 1 Схема графического определения коэффициента эффективной вязкости μ_0^* .

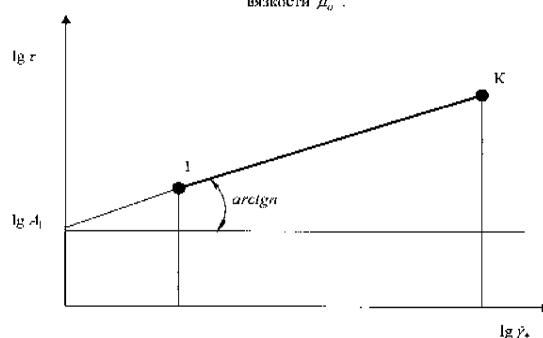


Рис. 2 Схема графического определения напряжения сдвига на стенке канала A_1 .

Список использованной литературы

1. Машиностроение. Энциклопедический справочник. – М.: Машгиз, 1947, т. 1, кн. 2. – 456 с.
2. Полищук В.Ю. Концепция развития прессующих механизмов технологических машин сельскохозяйственного производства. Автореферат дисс. доктора техн. наук – Оренбург: ОГСХА – 1994. – 35 с.
3. Силин В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных механизмах. – М.: Машиностроение, 1972. – 147 с.
4. Макаров Е.С. Определение параметров процесса экструдирования кормов и разработка методики расчета пресс-экструдера. Дисс. канд. техн. наук – М.: ВИЭСХ, 1985. – 208 с.
5. Соколов А.Я., Бондарева И.А., Полищук В.Ю. Для уточнения параметров гранулирования. Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность, 1986, № 7. – С. 38-40.
6. Реометрия пищевого сырья и продуктов. Справочник /Под ред. Ю.А. Мачихина – М.: Агропромиздат. –1990. – 271 с.

Статья поступила в редакцию 30.07.99