

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО СВОЙСТВ ПРИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ СДВИГА

В полости утечек шнекового пресса в процессе работы происходит движение экструдированного материала с большой скоростью сдвига. Такие скорости сдвига трудно достижимы в капиллярных и ротационных вискозиметрах. Отсутствие данных о свойствах материалов растительного происхождения при больших скоростях сдвига не позволяет адекватно рассчитывать потребляемую при их экструдировании энергию. В статье рассматривается вопрос определения вязкости моделированием течения материала в полости утечек.

Процесс экструдирования в шнековых прессах широко применяется для производства пищевых продуктов. Анализ исследований этого процесса позволяет сделать вывод о необходимости более подробного определения реологических свойств экструдированных полуфабрикатов. Известно, что в тонком слое экструдированного материала в зоне утечек, в компрессионном затворе и насадке типа «торпедо», возникают скорости сдвига значительно большие, чем в канале шнека. Еще Г. Шенкель [1] отмечал, что, по-видимому, вязкость материала в полости утечек сильно отличается от вязкости в канале шнека. Отсутствие данных о свойствах материалов растительного происхождения при больших скоростях сдвига не позволяет адекватно рассчитывать потребляемую при их экструдировании энергию.

Существующие капиллярные и ротационные вискозиметры не позволяют достаточно точно смоделировать течение материалов большой вязкости со значительными скоростями сдвига. В капиллярных вискозиметрах для этого трудно создать необходимое давление. Полуфабрикаты растительного происхождения в ротационных вискозиметрах разогреваются и изменяют внутреннюю структуру, что приводит к изменению вязкости в зависимости от времени и интенсивности воздействия, которые трудно учитывать.

Указанные проблемы можно устранить, определяя вязкость в сложном движении материала при его продавливании через кольцевую полость с вращающейся стенкой. Изменяя расход материала через полость и скорость вращения стенки, можно получить заданное воздействие на материал и определить его вязкость. При этом следует стремиться, чтобы параметры процесса течения как можно более точно совпада-

ли с параметрами процесса в моделируемой полости экструдера.

Анализ теоретических зависимостей движения материала в кольцевых полостях экструдера [1] показывает, что характер этого движения определяют технологические параметры материала (рецептура, влажность и температура), геометрические размеры полости, кинематический параметр – относительная угловая скорость вращения стенок и динамические параметры – создаваемый на стенке крутящий момент, а также градиент давления в материале вдоль оси полости. Измерение динамических параметров непосредственно на прессе-экструдере является сложной задачей. Поэтому целесообразно проводить исследования на модели, которая позволяет измерять динамические параметры. Схема устройства, реализующего такую модель [2], показана на рисунке 1.

Устройство состоит из цилиндрической насадки 1, соосно расположенной внутри цилиндрической оболочки 2. Насадка 1. установлена на вращающемся штоке 3. Длина z_n насадки 1, зазор Δr между насадкой и оболочкой 2 могут быть изменены за счет замены насадки. На внешней поверхности оболочки 2 наклеены тензометрические датчики 4 и 5 для измерения соответственно осевой и окружной деформации оболочки. Датчики расположены симметрично относительно поперечного сечения, в котором измеряется давление прессования [3]. Кроме того, на оболочку наклеены тензометрические датчики 6 и 7 для измерения крутящего момента [4].

Исследуемый материал прессуется поршнем (на рисунке 1 не показан), который движется с постоянной заданной скоростью. Это обеспечивает постоянство расхода материала через кольцевую полость. При этом насадка 1 вращается с заданной угловой скоростью.

Для повышения точности измерений датчики 4 и 5 подключают в разные плечи электрического полумоста. При этом происходит температурная компенсация измерительной системы.

Датчики 6 и 7 также подключают в разные плечи электрического полумоста.

Крутящий момент M_2 в оболочке 2 определим через тарировочный момент $M_{тар}$ выражением

$$M_2 = \lambda_M M_{тар}, \quad (1)$$

где λ_M – отношение величины измеренного сигнала с тензодатчиков к величине сигнала при тарировочном крутящем моменте.

Задача определения давления в материале σ_z , находящемся внутри оболочки, по меридиональной и окружной деформациям этой оболочки в данном поперечном сечении рассмотрена нами ранее [4]. Если провести тарировку тензометрической системы осевым сжатием оболочки силой $P_{тар}$, то давление в материале σ_{zm} в данном сечении можно определить из выражения

$$\sigma_{zm} = -\frac{(v+1)\lambda_\sigma P_{тар}}{\pi r_2^2}, \quad (2)$$

где v – коэффициент поперечной деформации материала оболочки;

λ_σ – отношение величины измеренного сигнала с тензодатчиков к величине сигнала при сжатии тарировочной силой $P_{тар}$;

r_2 – радиус внутренней цилиндрической поверхности оболочки фильеры.

Зависимость (2) может быть использована для нахождения градиента давления в материале в пределах полости по выражению

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{\sigma_{zm}}{z_n}. \quad (3)$$

Предполагается, что прессуемый материал в канале фильеры течет как вязкая жидкость, причем справедлива зависимость:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad (4)$$

где τ – напряжение сдвига в материале на цилиндрической поверхности радиусом r ;

μ – вязкость, которой приписывают смысл эффективной вязкости [5];

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

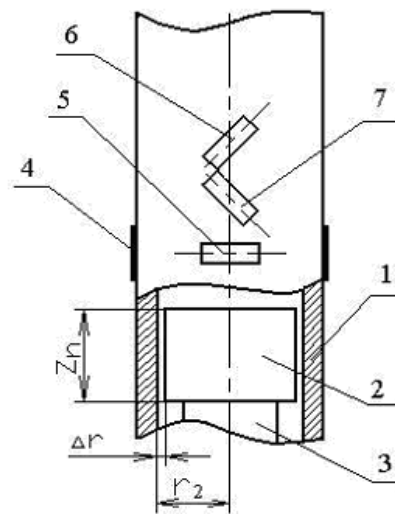


Рисунок 1.

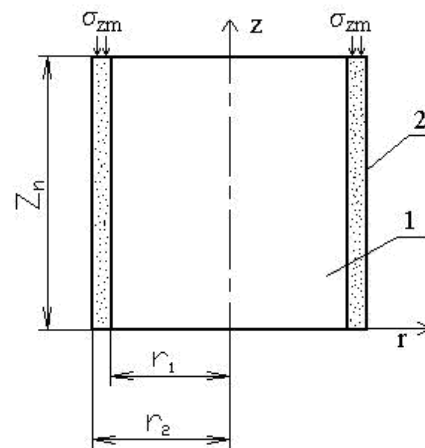


Рисунок 2.

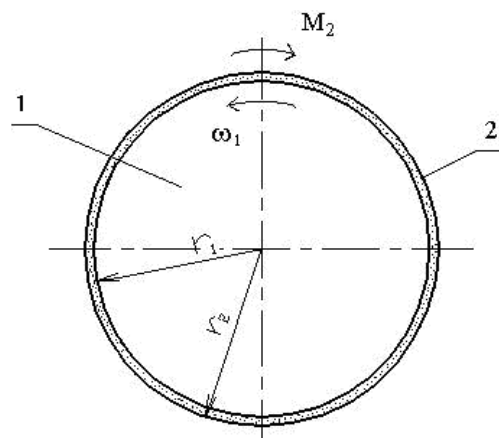


Рисунок 3.

Отсюда вязкость материала равна:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (5)$$

В вискозиметрии вязкость определяется по консистентным переменным – пристенной скорости сдвига $\dot{\gamma}(r_2)$ и пристенному напряжению сдвига $\tau(r_2)$ в исследуемом материале [5]. В нашем случае определяется вязкость на неподвижной внутренней поверхности фильеры.

Отнесем полость к цилиндрической системе координат и зададим граничные условия, как показано на рисунках 2 и 3.

Абсолютная скорость сдвига $\dot{\gamma}$ при сложном сдвиге определяется по формуле

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_z^2 + \dot{\gamma}_\varphi^2}, \quad (6)$$

где $\dot{\gamma}_z$ – осевая скорость сдвига;

$\dot{\gamma}_\varphi$ – окружная скорость сдвига.

Аналогично результирующее напряжение сдвига τ при сложном сдвиге определяется по формуле

$$\tau = \sqrt{\tau_z^2 + \tau_\varphi^2}, \quad (7)$$

где τ_z – осевое напряжение сдвига;

τ_φ – окружное напряжение сдвига.

Окружная составляющая консистентных переменных соответствует случаю ротационного вискозиметра [5] и в наших обозначениях имеет вид:

$$\tau_\varphi(r_2) = -\frac{M_2}{2\pi z_n r_2^2}, \quad (8)$$

$$\dot{\gamma}_\varphi(r_2) = \frac{2\omega_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (9)$$

где ω_1 – угловая скорость цилиндрической насадки 1;

r_1 – внешний радиус цилиндрической насадки.

Определим осевую составляющую консистентных переменных в кольцевой полости на внутренней поверхности фильеры.

При воздействии осевого давления на испытуемый материал справедливо уравнение

$$\frac{d[r\tau_z(r)]}{dr} = -r \frac{d\sigma_z}{dz}. \quad (10)$$

После интегрирования уравнения (10) и преобразований получим:

$$\tau_z(r) = -\frac{d\sigma_z}{dz} \frac{r}{2} + \frac{E}{r}. \quad (11)$$

По определению

$$\dot{\gamma}_z(r) = \frac{dv_z(r)}{dr}, \quad (12)$$

где $v_z(r)$ – осевая скорость материала в полости на поверхности радиуса r .

Проинтегрировав уравнение (11) с учетом уравнений (4) и (12), получим

$$v_z(r) = -\frac{1}{\mu} \frac{d\sigma_z}{dz} \frac{r^2}{4} + \frac{1}{\mu} E \ln r + F. \quad (13)$$

Приняв условия прилипания на границах полости, то есть $v_z(r_1) = 0$ и $v_z(r_2) = 0$, можно выразить постоянные интегрирования из уравнения (13)

$$E = \frac{1}{4} \frac{d\sigma_z}{dz} \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}; \quad (14)$$

$$F = \frac{1}{8\mu} \frac{d\sigma_z}{dz} \left[r_1^2 + r_2^2 - \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln(r_1 r_2) \right]. \quad (15)$$

Подставив значение E из (14) в уравнение (11) и приняв $r = r_2$, получим пристенное напряжение сдвига в осевом направлении

$$\tau_z(r_2) = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_z}{dz} \left(\frac{(r_2^2 - r_1^2)}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} - r_2 \right). \quad (16)$$

С учетом (14) и (15) уравнение (13) примет вид

$$v_z(r) = -\frac{1}{4\mu_z} \frac{d\sigma_z}{dz} \left(r^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln r + \frac{r_2^2 \ln r_1 - r_1^2 \ln r_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right). \quad (17)$$

Зная распределение осевых скоростей, можно найти объемный расход материала Q через полость интегрированием выражения

$$Q = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r v_z(r) dr. \quad (18)$$

Подставив в (18) значение скорости из (17), после интегрирования получим

$$Q = \frac{\pi}{8\mu} \frac{d\sigma_z}{dz} \left[r_2^4 - r_1^4 - \frac{(r_2^2 - r_1^2)^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right]. \quad (19)$$

Приведем уравнение (19) к виду (5)

$$\mu = \frac{\pi}{8Q} \frac{d\sigma_z}{dz} \left[r_2^4 - r_1^4 - \frac{(r_2^2 - r_1^2)^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right]. \quad (20)$$

Сравним (20) и (5). С учетом (11) и (14), выделив из уравнения (20) члены, соответствующие окружному пристенному напряжению сдвига, присвоим оставшимся членам значение окружной пристенной скорости сдвига

$$\dot{\gamma}_z(r_2) = \frac{2Q}{\pi} \frac{r_2^2 - r_1^2 - 2r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2(r_2^2 - r_1^2) \left[\left(\ln \frac{r_2}{r_1} + 1 \right) (r_2^2 + r_1^2) - 2r_2^2 \right]}. \quad (21)$$

Входящая в уравнение (21) производительность подлежит экспериментальному определению, например по скорости перемещения поршня, прессирующего исследуемый материал.

Подставив значение окружной пристенной скорости сдвига из уравнения (9) и осевой пристенной скорости сдвига из уравнения (21) в уравнение (6), а значение окружного пристенного напряжения сдвига из уравнения (8) и осевого пристенного напряжения сдвига из уравнения (16) в уравнение (7), по формуле (5) определим вязкость исследуемого материала. При этом можно рассматривать вязкость как функцию напряжения сдвига и скорости сдвига, то есть идентифицировать любое реологическое тело по существующим методикам вискозиметрии.

Таким образом, с помощью предлагаемого способа можно определять реологические свойства материалов высокой вязкости по абсолютной скорости сдвига и результирующему напряжению сдвига в условиях сложного сдвига в пристенной области.

Список использованной литературы:

1. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс: Пер. с нем. / Под ред. А.Я. Шапиро. – Л.: ГНТИХП, 1962. – 467 с.
2. Патент РФ №2194266, 10 декабря 2002 г. Устройство для исследования течения материала при сложном сдвиге.
3. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Под ред. канд. техн. наук Р.А. Макарова. М.: «Машиностроение», 1975. – 288 с.
4. Полищук В.Ю., Сагитов Р.Ф., Фисенко К.А., Ханин В.П. Измерение нормального давления в рабочей зоне шнекового пресса с помощью тензодатчиков, укрепленных на наружной поверхности шнекового корпуса // Тезисы докладов трудов сотрудников и преподавателей факультета механизации сельского хозяйства. Том 3. – Оренбург: ОГАУ, 1999. С. 74.
5. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник / Под ред. Ю.А. Мачихина. М.: Агропромиздат. – 1990. – 271 с.