

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ПЛАСТМАСС В КАНАЛЕ ШНЕКА

Рассматривается течение многокомпонентных композиционных материалов в каналах шнекового прессующего механизма методами реологии, с учетом послойного изменения температуры по глубине канала.

Ключевые слова: шнек, древесно-полимерные композиционные материалы, скорость сдвига, коэффициент консистенции, напряжение сдвига, индекс течения.

В настоящее время в России достаточно остро стоит вопрос о переработке различных видов отходов, в частности в деревоперерабатывающей, химической, пищевой отраслях промышленности накапливается большое количество неперерабатываемых в настоящее время полностью отходов (щепа, опилки, лузга, отруби, отходы пластических масс, резинотехнического производства) [2].

На западе уже давно применяется метод переработки отходов различных видов производств с получением термопластичных древесно-полимерных композиционных материалов (ДПКТ), не имеющих формальдегидсодержащей составляющей, относящейся к канцерогенным веществам [1].

Одной из основных машин, реализующих эту технологию, является одношнековый пресс-экструдер.

Прессующий механизм одношнекового экструдера (рисунок 1) образован винтовым шнеком 1 и шнековым цилиндром 2. Взаимодействие прессуемого материала с рабочими органами связано с движением материала в пространстве между этими органами [3].

На нижней плоскости, полученной путем развертки цилиндрической поверхности шнека, винтовые лопасти шнека могут быть представлены кусками параллельных между собой

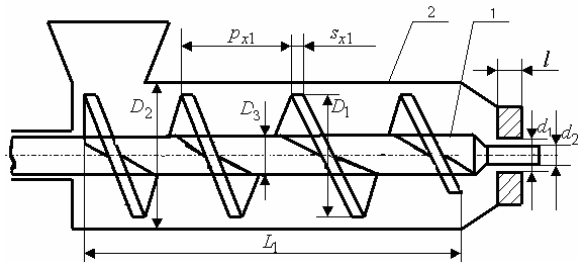


Рисунок 1. Схема шнекового прессующего механизма

плоскостей, перпендикулярных этой плоскости и наклонных к направляющей цилиндра под углом подъема α винтовых поверхностей лопастей шнека. В этой модели шнековой части механизма прессуемый материал движется по прямоугольным каналам, образованным развертками контактных поверхностей шнека и шнекового цилиндра (рисунок 2).

Без учета трения о лопасти шнека задача о движении прессуемого материала плоской модели механизма рассмотрена нами в предположении, что прессуемый материал проявляет в канале шнека свойства псевдопластического тела, дви-

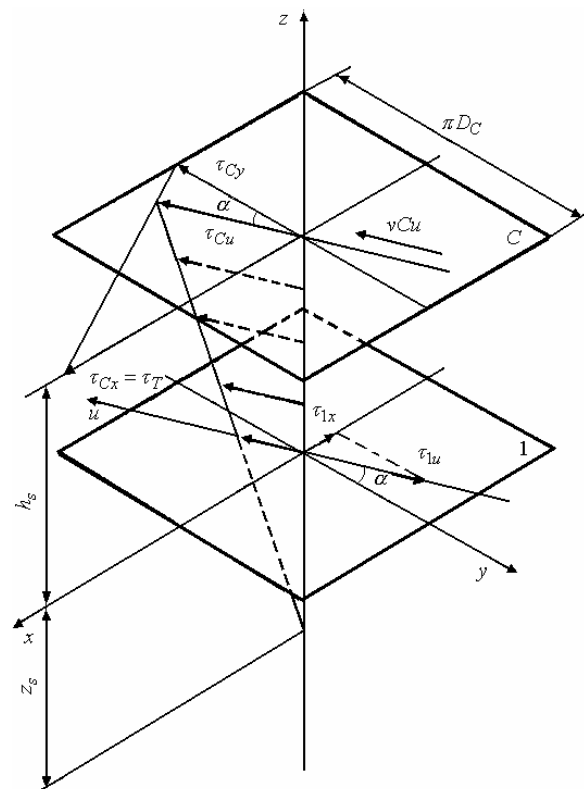


Рисунок 2. Схема распределения касательных напряжений в модели шнекового канала

жение которого может быть описано реологическим степенным уравнением Оствальда-де Вилля:

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

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига прессуемого материала;
 τ – напряжение сдвига в прессуемом материале;
 n – индекс течения;
 μ' – коэффициент консистенции материала.
 Параметры μ', n зависят от состава корма, его температуры и влажности.

Рассмотрим напряженное состояние прессуемого материала. При движении прессуемого материала в экструдере массовыми силами по сравнению с напряжениями, возникающими при перемещении прессуемого материала по контактными поверхностям рабочих органов, можно пренебречь. Рассмотрим модель прессующего механизма в координатах $Oxuy$. Ось Ox направлена вдоль оси корпуса шнека, а ось Oy в окружном направлении. Ось канала шнека Ou в этом случае образует с осью Oy угол α .

Плоскости развертки шнекового цилиндра присвоим индекс 2, а плоскости развертки стержня – индекс 1. В обратном движении плоскость 2 движется вдоль оси канала шнека со скоростью v_2 . Это движение можно рассматривать как движение со скоростями вдоль осей координат v_x и v_y .

Можно предположить, что прессуемый материал движется вдоль меридиональных неровностей с проскальзыванием. При этом она развивает на плоскости 2 касательные напряжения τ_{2x} (рисунок 2).

Окончательно получим:

$$\tau_u = \frac{d\sigma_u}{du} (z - z_s). \quad (2)$$

При $z = h_s$ $\tau_u = \tau_{2u}$ уравнение примет вид:

$$\tau_{2u} = \frac{d\sigma_u}{du} (h_s - z_s). \quad (3)$$

Предположим, что температура экструдированного материала изменяется по высоте канала шнека. Это вызывает изменение по высоте канала шнека реологических свойств экструдированного материала. Разделим пространство модели шнекового канала плоскостями, параллельными пластинам, на I слоев высотой h_i (рисунок 3) так, чтобы

$$h_s = \sum_1^I h_i. \quad (4)$$

Будем считать, что реологические свойства экструдированного материала изменяются кусочно-постоянно в соответствии с этими слоями.

При нормальной работе шнекового прессующего механизма в зависимости от реологических свойств прессуемого материала возможны четыре случая решения уравнения (2).

Пусть реологические свойства прессуемого материала таковы, что z_s заключено в интервале от 0 до h_s – расстояния между контактными с материалом пластинами, тогда

$$\dot{\gamma}_{u1} = a_{si} (z_s - z)^{b_i - 1}, \quad z \leq z_s; \quad i = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (5)$$

$$\dot{\gamma}_{u2} = -a_{si} (z - z_s)^{b_i - 1}, \quad z \geq z_s, \quad i = k, \dots, I. \quad (6)$$

Для сокращения введены обозначения

$$a_{si} = \left(\frac{1}{\mu'_i} \right)^{b_i - 1} \left(\frac{d\sigma_u}{du} \right)^{b_i - 1}, \quad (7)$$

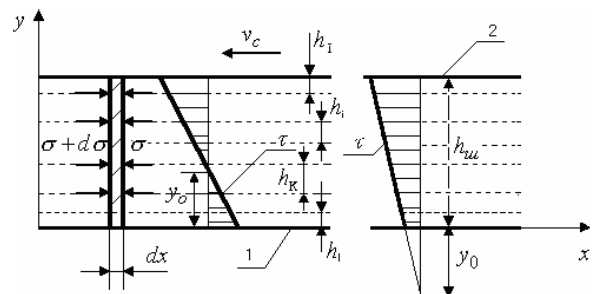
$$b_i = \frac{1 + n_i}{n_i}. \quad (8)$$

Интегрируя уравнения (5), (6) и учитывая, что скорость сдвига материала $\dot{\gamma}_u$ можно выразить через относительную скорость v_u выражением

$$\dot{\gamma}_u = \frac{dv_u}{dz}, \quad (9)$$

приняв на пластинах условия прилипания, получим, учитывая, что $h_0 = 0$,

$$v_{u1} = v_{u(i-1)} + \frac{a_{si}}{b_i} \left[\left(z_s - \sum_1^i h_{i-1} \right)^{b_i} - (z_s - z)^{b_i} \right], \quad z \leq z_s; \quad i = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (10)$$



1 – плоскость, замещающая шнековый корпус;
 2 – плоскость, замещающая дно шнекового канала.

Рисунок 3. Схема модели шнекового канала

$$v_{u2} = v_{ui} + \frac{a_{si}}{b_i} \left[\left(\sum_1^i h_i - z_s \right)^{b_i} - (z - z_s)^{b_i} \right],$$

$$z \geq z_s, i = k, \dots, I. \quad (11)$$

Здесь $\dot{\gamma}_{u1}$, v_{u1} – скорости для $z \leq z_s$, а $\dot{\gamma}_{u2}$, v_{u2} – скорости для $z \geq z_s$, v_{ui} , $v_{u(i-1)}$ – соответственно скорости движения материала на верхней плоскости i -го и $(i-1)$ -го слоев, $v_{u1} = v_{2u}$ – скорость движения подвижной пластины (рисунк 3).

Приняв условие непрерывности скоростей $v_{u1} = v_{u2}$ при $z = z_s$ и используя системы уравнений (10) и (11), можно найти координату z_s и определить распределение скоростей в канале шнека.

Градиент давления можно определить, задавая напряжение σ_1 в прессуемом материале перед матрицей прессующего механизма и длину прессования в канале u_1 выражением

$$\frac{d\sigma_u}{du} = \frac{\sigma_1}{u_1}. \quad (12)$$

Объемный расход Q прессуемого материала при движении без проскальзывания по пластинам на единичной ширине пространства между пластинами для случая

$$h_s \geq z_s > 0 \quad (13)$$

можно определить, используя выражения (10) и (11) для скорости течения материала в шнековом канале интегрированием элементарных потоков

$$Q = \int_0^{z_s} v_{u1} dz + \int_{z_s}^{h_s} v_{u2} dz = Q_1 + Q_2, \quad (14)$$

$$Q_1 = \sum_1^{k-1} \left\{ v_{u(i-1)} h_i + \frac{a_{si}}{b_i} \left(z_s - \sum_1^i h_{i-1} \right) h_i + \frac{a_{si}}{b_i(b_i+1)} \left[\left(z_s - \sum_1^i h_i \right)^{b_i+1} - \left(z_s - \sum_1^{i-1} h_i \right)^{b_i+1} \right] + v_{u(k-1)} \left(z_s - \sum_1^k h_{i-1} \right) + \frac{a_{sk}}{b_k+1} \left(z_s - \sum_1^k h_{i-1} \right)^{b_k+1} \right\}. \quad (15)$$

$$Q_2 = \sum_{k+1}^I \left\{ v_{ui} h_i + \frac{a_{si}}{b_i} \left(\sum_1^i h_i - z_s \right)^{b_i} h_i + \frac{a_{si}}{b_i(b_i+1)} \left[\left(\sum_1^i h_i - z_s \right)^{b_i+1} - \left(\sum_1^{i-1} h_{i-1} - z_s \right)^{b_i+1} \right] \right\} + v_{uk} \left(\sum_1^k h_i - z_s \right) + \frac{a_{sk}}{b_k} \frac{b_k+2}{b_k+1} \left(\sum_1^k h_i - z_s \right)^{b_k+1}. \quad (16)$$

$$0 = v_{u1} + \frac{a_{s1}}{b_1} \left[(h_1 - z_s)^{b_1} - (-z_s)^{b_1} \right], \quad (17)$$

Для случая, когда $z_s \leq 0$, производная скорости не меняет свой знак в области течения между пластинами. Соответственно не меняют свой знак напряжения сдвига в прессуемом материале. Тогда, используя систему уравнений (11) и предполагая отсутствие проскальзывания на нижней пластине, то есть $v_u = 0$ при $z = 0$, получим уравнение распределения скоростей в области течения,

которое делает систему (11) замкнутой. Из этой системы получим координату точки z_s .

На единичной ширине пространства между пластинами объемный расход Q прессуемого материала при движении без проскальзывания при $z_s < 0$ можно определить, используя выражение (17) для скорости течения материала в шнековом канале, интегрированием элементарных потоков

$$Q = \int_0^{h_s} v_{u2} dz = \sum_1^I \left\{ v_{ui} h_i + \frac{a_{si}}{b_i} \left(\sum_1^i h_i - z_s \right)^{b_i} h_i + \frac{a_{si}}{b_i(b_i+1)} \left[\left(\sum_1^i h_i - z_s \right)^{b_i+1} - \left(\sum_1^{i-1} h_{i-1} - z_s \right)^{b_i+1} \right] \right\}. \quad (18)$$

Для псевдо-пластического тела при экструзии кормов реологические свойства прессуемого материала могут быть таковы, что прессуемый материал движется с проскальзыванием по шнеку. При этом плоскость $z = z_s$ проходит вне слоя прессуемого материала, находящегося между двумя пластинами, моделирующими шнековый прессующий механизм, то есть $z_s < 0$, а напряжение сдвига на нижней пластине превосходит предельное напряжение трения, то есть возникает пристенное скольжение.

Если известно напряжение граничного трения θ , из уравнения (2) можно определить величину z_s при граничном условии $\tau_{1u} = -\theta$ при $z = 0$, тогда

$$z_s = \theta \left(\frac{d\sigma_u}{du} \right)^{-1}. \quad (19)$$

Уравнение (19) делает систему (11) замкнутой.

Пусть $z_s < 0$, тогда слой прессуемого материала движется между пластинами со скоростью, описываемой только системой уравнений (11), причем при $z = 0$ $v_u > 0$. Объемный расход Q прессуемого материала на единичной ширине пространства между пластинами для случая проскальзывания по нижней пластине (19).

Движение с проскальзыванием по нижней пластине возможно и при условии, когда производная скорости изменяет свой знак в области течения между пластинами, то есть при выполнении условия (13).

Если известно напряжение граничного трения по нижней пластине θ , то можно определить величину z_s по формуле (19) и, добавив в систему (10) уравнение для участка $i = 1$,

$$v_0 = v_{u1} + \frac{a_{s1}}{b_1} \left[(h_1 - z_s)^{b_1} - (z - z_s)^{b_1} \right], \quad (20)$$

найти неизвестную скорость скольжения по нижней пластине v_0 .

На единичной ширине пространства между пластинами объемный расход Q прессуемого материала, проскальзывающего по нижней пластине, для случая $h_s > z_s > 0$ можно определить по формуле (14) с учетом в формуле (15) скорости v_0 .

Связь между окружной скоростью шнекового цилиндра v_{2y} и скоростью v_{2u} определена соотношением

$$v_{2u} = v_{2y} \cos \alpha. \quad (21)$$

Для оценки интенсивности воздействия процесса экструзии на обрабатываемый продукт в канале шнека может быть использована средняя скорость сдвига псевдопластического прессуемого материала

$$\dot{\gamma}_{иср} = \frac{1}{h_s} \left(\int_0^{z_2} \dot{\gamma}_{u1} dz + \int_0^{z_2} \dot{\gamma}_{u2} dz \right). \quad (22)$$

Для случая, когда производная скорости изменяет свой знак в области течения прессуемого материала, интегралы в (22) определены выражениями с использованием (5), (6), учитывая, что $h_0 = 0$,

$$\dot{\gamma}_{u1cp} = \frac{1}{z_s} \left\{ \sum_1^{k-1} \frac{a_{si}}{b_i - 1} \left[\left(z_s - \sum_1^i h_{i-1} \right)^{b_i} - \left(z_s - \sum_1^i h_i \right)^{b_i} \right] + \frac{a_{sk}}{b_k - 1} \left(z_s - \sum_1^{k-1} h_i \right)^{b_k} \right\}, \quad (23)$$

$$\dot{\gamma}_{u2cp} = \frac{1}{h_s - z_s} \left\{ \sum_k^I \frac{a_{si}}{b_i - 1} \left[\left(\sum_1^i h_i - z_s \right)^{b_i} - \left(\sum_1^i h_{i-1} - z_s \right)^{b_i} \right] - \frac{a_{sk}}{b_k - 1} \left(\sum_1^k h_i - z_s \right)^{b_k} \right\}, \quad (24)$$

$$\dot{\gamma}_{cp} = \frac{|\dot{\gamma}_{u1cp}| z_s + |\dot{\gamma}_{u2cp}| (h_s - z_s)}{h_s}. \quad (25)$$

Производительность Q_s одношнекового прессующего механизма с учетом формул (14) и (18) определяется выражением

$$Q_s = \rho (p_{x1} - q_{s_{x1}}) Q \cos \alpha, \quad (26)$$

где ρ – плотность прессуемого материала;

p_{x1} – осевой шаг винтовой лопасти шнека на цилиндрической поверхности диаметром D_C ;

q – число заходов шнека;

s_{x1} – осевая толщина винтовой лопасти шнека по цилиндрической поверхности диаметром D_2 .

В результате предложена математическая модель течения псевдопластического материала в канале шнека с учетом изменения температуры экструдруемого материала по высоте канала шнека.

Список использованной литературы:

1. Шейдин И. А., Пюдик П. Э., Технология производства древесных пластиков и их применение, М.: Лесная промышленность, 1971. – с. 320.
2. Шулепов И.А., Доронин Ю.Г. Древесные слоистые пластики. – М.: Лесная промышленность, 1987. – с. 220.
3. Полищук В.Ю., Коротков В.Г., Зубкова Т.М. Проектирование экструдеров для отраслей АПК. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – с. 260.

Сведения об авторах:

Полищук Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и пищевых производств Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, кафедра МАХПП, тел. (3532)314266

Рекун Кирил Олегович, аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств Казанского государственного технологического университета. тел. 89128413165.

Федоров Евгений Александрович, инженер кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств Оренбургского государственного университета, тел. 89228036993.

Сагитов Рамиль Фаргатович, доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств, Оренбургского государственного университета, канд. техн. наук, доцент. 460018, г. Оренбург, пр-кт Победы 13, кафедра МАХПП ГОУ ОГУ, тел. (3532)314266

Polishchuk V.Yu., Sagitov R.F., Fedorov E.A., Rekun K.O.

Theoretical bases of description of high-filled plastics movement process in the screw channel

The flow of many-component composition materials in channels of screw press mechanism is regarded with methods of rheology, with accounting layer-by-layer changes of temperature at the channel's depth.

Key words: screw, wood-polymer composite, speed of fault, coefficient of consistence, tension of fault, index of flow.

Bibliography:

1. Sheidin I.A., Pjudik P.E., Tree plastics production technology and its application, M.: Tree industry, 1971. – p.320.
2. Shulepov I.A., Doronin Ju. G. Tree layer plastics. – M.: Tree Industry, 1987. – p.220.
3. Polishjuk V. Ju., Korotkov V. G., Zubkova T. M. Ekstruders designing for branches of AIC. Yekaterinburg: UrO RAN, 2003. – p.260.