

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ СОСТОЯНИЯ ПОКОЯ В ДВИЖЕНИЕ

Методами теории пластичности исследовано напряженное состояние материала, экструдированного в цилиндрическом канале фильеры, для случая произвольного изменения предела текучести и коэффициента контактного трения.

Ключевые слова: гранулирование, биоэнергетика, древесные опилки, топливные гранулы, пеллеты.

Разработка техники и технологии для проведения ресурсосберегающих процессов на основе возобновляемых источников сырья актуальна. Одним из направлений развития является производство древесных пеллет для сжигания в котельных установках.

Для эффективного проведения процесса производств пеллет необходимо наличие высокотехнологичной техники, обеспечивающей заданные качества. Реализация этой возможности производится посредством изучения поведения материала в рабочих полостях пресс-грануляторов с кольцевой матрицей.

Обычно основная часть канала фильеры представляет собой цилиндрическую полость, поэтому сопротивление фильеры определяется напряженным состоянием экструдата в этой полости. Существуют два различных вида напряженного состояния в канале фильеры. Первый возникает при переходе из состояния покоя в движение, второй – при установившемся движении.

Решение задачи определения напряженного состояния экструдата при установившемся движении без наложения ограничений на характер изменения предела текучести и коэффициента контактного трения получено нами ранее [2], [3]. В настоящей статье рассмотрено напряженное состояние экструдата в начале движения в канале фильеры.

Отнесем цилиндрический канал фильеры диаметром D и длиной z_c к цилиндрической системе координат (координаты r, φ, z). Начало координат поместим в выходном сечении канала. Ось z направим ко входному отверстию. Осевое сечение канала фильеры показано на рисунке 1.

Объемными силами, возникающими при движении материала, будем пренебрегать по срав-

нению с напряжениями, возникающими в экструдате. В этом случае дифференциальные уравнения движения материала совпадают с дифференциальными уравнениями равновесия. Будем считать нормальные осевые напряжения σ_z постоянными по плоскости поперечного сечения канала фильеры, а касательные напряжения достигающими максимального значения τ на контактной поверхности канала фильеры сечения. В работе [4] было получено дифференциальное уравнение для изучения напряженного состояния материала, заполняющего цилиндрическую полость при его пластическом течении:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} - \frac{4\tau}{D} = 0. \quad (1)$$

В уравнении (1) учтено, что напряжения в опилках будут сжимающими по всей полости фильеры и, для удобства, сжимающим напряжениям приписано положительное значение. Этим оно отличается от аналогичного уравнения, используемого в инженерной теории пластичности [5].

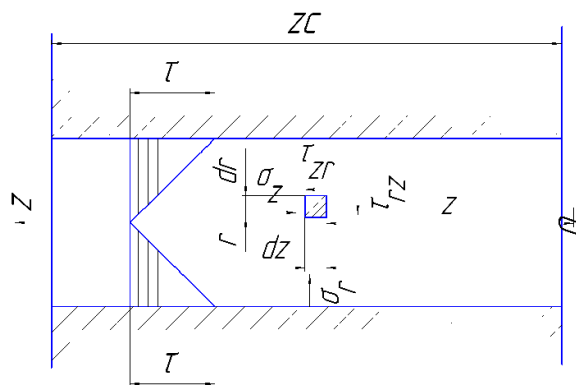


Рисунок 1. Схема напряжений в опилках, находящихся в цилиндрическом канале фильеры

Начальными условиями решений дифференциального уравнения (1) на выходе из канала фильеры будут:

$$z = 0, \sigma_z = 0, \sigma_r = \sigma_{TO}. \quad (2)$$

Значения напряжений (2) соответствуют предельному состоянию материала.

Характерной особенностью напряженного состояния опилок в начальный момент движения в этом режиме прессования является условие

$$\sigma_z > \sigma_r = \sigma_t. \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что величина всестороннего давления σ_c в экструдате определена нормальным радиальным напряжением σ_r , то есть

$$\sigma_c = \sigma_r. \quad (4)$$

Интенсивность нормальных напряжений σ_u в любом поперечном сечении цилиндрического канала при этом режиме прессования (3) будет

$$\sigma_u = \sigma_z - \sigma_r. \quad (5)$$

Свяжем σ_u с пределом текучести экструдата σ_T условием Мизеса

$$\sigma_u = \sigma_T. \quad (6)$$

Воспользуемся для описания зависимости предела текучести от всестороннего давления полигональной аппроксимацией. В этом случае функция изменения предела текучести в зависимости от величины всестороннего давления на i -ом отрезке может быть представлена в виде

$$\sigma_T = \sigma_{T(i-1)} + \delta_i (\sigma_r - \sigma_{r(i-1)}), \sigma_{r(i-1)} \leq \sigma_r \leq \sigma_{ri}, \quad (7)$$

где

$$\delta_i = \frac{\sigma_{Ti} - \sigma_{T(i-1)}}{\sigma_{ri} - \sigma_{r(i-1)}}. \quad (8)$$

С учетом зависимостей (5), (6) и (7) дифференциальное уравнение (1) примет вид

$$\frac{d\sigma_r}{dz} - \frac{4\tau}{(1 + \delta_i)D} = 0, \sigma_{r(i-1)} \leq \sigma_r \leq \sigma_{ri}. \quad (9)$$

Касательное напряжение опилок τ на контактной поверхности канала определяется в зависимости от нормального напряжения σ_n на этой же поверхности и коэффициента трения f законом Кулона:

$$\tau = f\sigma_n. \quad (10)$$

Для цилиндрического канала фильеры $\sigma_n = \sigma_r$.

Воспользуемся предположением о постоянстве коэффициента контактного трения в каждом

диапазоне кусочно-линейного представления функции изменения предела текучести σ_T (7)

$$f_i = \text{const}, \sigma_{r(i-1)} \leq \sigma_r \leq \sigma_{ri}. \quad (11)$$

В области, где касательное напряжение контактного трения достигает предела текучести сдвига опилок, дальнейшее его увеличение не может происходить. В противном случае начнется скольжение в пристенном слое опилок и будет происходить залипание контактной поверхности канала фильеры слоем опилок. В то же время результаты экспериментальных исследований, характер износа поверхности фильер убедительно подтверждают, что имеется скольжение материала по контактной поверхности фильер. В связи с изложенным будем полагать, что касательное напряжение на контактной поверхности канала в рассматриваемой области равно предельному напряжению сдвига τ_T ,

$$\tau = \tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}. \quad (12)$$

Граничное значение нормального напряжения опилок на стыке двух областей контактной поверхности в точке b определяется уравнением непрерывности касательных напряжений:

$$f\sigma_{nb} = \tau_T. \quad (13)$$

Вместе с начальными условиями на выходе из фильеры (2) выражение (5) показывает, что опилки вблизи выходного сечения канала находятся в упругом состоянии.

Относительная радиальная деформация упругого тела, находящегося в условиях объемно-деформированного и объемно-напряженного состояния, связана обобщенным законом Гука с компонентами напряжений следующим образом

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_z + \sigma_t)], \quad (14)$$

где ν – коэффициент поперечной деформации опилок.

Тогда для выходного сечения цилиндрического канала из условий (2) и (3) упругая радиальная деформация опилок будет

при $z = 0$,

$$\varepsilon_{r0} = \frac{\sigma_{TO}}{E} (1 - \nu) \cdot z = 0. \quad (15)$$

Во всей области упругого сжатия опилок в цилиндрическом канале относительные ради-

альные деформации равны между собой и определяются соотношением

$$\epsilon_r = \epsilon_{r0}. \quad (16)$$

Подставляя в уравнение (16) выражения (14), (15) и учитывая соотношение (3), после преобразований получим зависимость

$$\sigma_r = \sigma_{TO} + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z, \quad (17)$$

связывающую нормальные радиальное и осевое напряжения в упругой области.

Для нахождения распределения нормальных напряжений в области упругого сжатия опилок в цилиндрическом канале воспользуемся дифференциальным уравнением (1). Подставляя в него выражения (10) и (17), после интегрирования и удовлетворения граничным условиям (2) получим

$$\sigma_r = \sigma_{TO} \exp \frac{4f_1 \nu z}{1-\nu D}. \quad (18)$$

Для определения границы между областью упругого сжатия опилок в цилиндрическом канале и областью упругопластических деформаций опилок воспользуемся условием начала пластического течения опилок (5), (6) и используем связь между относительной радиальной деформацией и компонентами напряжения, определяемую уравнением (14). Получим

при $z = z_a$,

$$\epsilon_{ra} = \frac{\sigma_{ra}(1-2\nu) - \nu \sigma_{TO}}{E}. \quad (19)$$

Подставляя в уравнение (16) выражения (15) и (19), будем иметь после преобразований

$$\sigma_{ra} = \frac{\sigma_{TO}}{1-2\nu}. \quad (20)$$

Определяя из уравнений (20) граничное значение нормального радиального напряжения σ_{ra} из формулы (18), можно определить границу между упругой и упругопластической областью напряженного состояния опилок

$$z_a = \frac{D(1-\nu)}{4f_1 \nu} \ln \frac{\sigma_{ra}}{\sigma_{TO}}. \quad (21)$$

Для области упругопластического состояния опилок в цилиндрическом канале дифференциальное уравнение напряженного состояния (9) с учетом выражений (10), (11) и граничных значений (20), (21) имеет решение. Интегрируя дифференциальное уравнение (9) и удов-

летворяя граничным условиям в начале отрезка интегрирования

при $z = z_{i-1}$,

$$\sigma_r = \sigma_{r(i-1)} \quad (22)$$

получим

$$\sigma_r = \sigma_{r(i-1)} \exp \left[\frac{4f_i}{(1+\delta_i)D} (z - z_{i-1}) \right]. \quad (23)$$

Область существования каждого решения (23) определяется значениями $z_{i-1} \leq z \leq z_i$, где значение каждой верхней границы области существования решений z_i определяется выражением

$$z_i = \frac{(1+\delta_i)D}{4f_i} \ln \frac{\sigma_{ri}}{\sigma_{r(i-1)}} + z_{i-1}. \quad (24)$$

Решение (23) дифференциального уравнения (9) существует до тех пор, пока радиальное напряжение не достигнет значения σ_{rb} , определяемого уравнением (13). Верхняя граница существования функции (23) на k -ом участке $\sigma_{r(k-1)} \leq \sigma_{rb} \leq \sigma_{rk}$ определена выражением

$$z_b = z_{k-1} + \frac{(1+\delta_k)D}{4f_k} \ln \frac{\sigma_{rb}}{\sigma_{r(k-1)}}. \quad (25)$$

За пределами существования функции (23) условие перехода материала в пластическое состояние (5) остается неизменным, но в связи с тем, что на площадке, перпендикулярной к одной из координатных осей, касательное напряжение достигло предельного напряжения сдвига τ_T , что после преобразований условие пластичности будет [6]

$$\sigma_z - \sigma_r = 0. \quad (26)$$

Для области упругопластического состояния опилок при $z > z_b$ необходимо обеспечить непрерывность вдоль координатной оси интегрирования не только касательных напряжений τ , но и нормальных напряжений σ_z , следовательно, уравнения изменения предела текучести и напряженного состояния опилок совпадают с полученными ранее

$$\sigma_z = \frac{\sigma_{T(i-1)}}{\delta_i} \left\{ \exp \left[\frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\delta_i}{D} (z - z_{i-1}) \right] - 1 \right\} + \sigma_{z(i-1)},$$

$$\sigma_{z(i-1)} \leq \sigma_z \leq \sigma_{z_i},$$

$$z_0 = z_b, \quad \sigma_{z0} = \sigma_{zb}. \quad (27)$$

$$z_i = \frac{\sqrt{3} D}{4 \delta_i} \ln \left[\frac{\delta_i}{\sigma_{T(i-1)}} (\sigma_{z_i} - \sigma_{z(i-1)}) + 1 \right] + z_{i-1}. \quad (28)$$

Для проверки предложенного способа определения напряженного состояния материала, прессуемого в цилиндрическом канале фильеры, предположим, что функция изменения предела текучести в зависимости от величины всестороннего давления имеет вид [2]

$$\sigma_T = \sigma_{TO} \exp(\beta \sigma_r), \text{ при } z_a \leq z < z_b; \quad (29)$$

$$\sigma_T = \sigma_{TO} \exp(\beta \sigma_r), \text{ при } z \geq z_b; \quad (30)$$

где β – коэффициент, учитывающий реологические свойства материала.

Задаваясь в формуле (29) величинами σ_{ri} , определяем величины σ_{Ti} .

Значения коэффициента трения определим по зависимости [2]

$$f_i = \frac{\tau_0}{\sigma_{ricp}} + f_1 + f_2 \sigma_{ricp}, \quad (31)$$

где $\sigma_{ricp} = \frac{\sigma_{ri} + \sigma_{r(i-1)}}{2}$ – среднее нормальное радиальное напряжение в фильере на i -ом участке.

Примем следующие значения параметров, входящих в зависимости (29) и (30): $\sigma_{TO} = 1,14$ МПа; $\beta = 0,015$ МПа⁻¹; $\tau_0 = 0,55$ МПа; $f_1 = 0,011$; $f_2 = 0,0003$ МПа⁻¹; $\nu = 0,23$.

В качестве примера на рисунке 2 приведена диаграмма изменения нормального осевого напряжения σ_z , нормального радиального напряжения σ_r , касательного напряжения τ , в зависимости от полной относительной длины фильеры z/D , вычисляемые по формулам (20), (21), (23), (24), (27), (28) с шагом аппроксимации $\Delta\sigma = 1$ МПа. Точка а имеет координату $z_a/D = 1,33$. Осевое нормальное напряжение в точке а – $\sigma_{za} = 3,219$ МПа. Радиальное нормальное напряжение в точке а – $\sigma_{ra} = 2,102$ МПа. Контактное касательное напряжение в точке а – $\tau_a = 0,574$ МПа. Точка б имеет координату $z_b/D = 8,35$. Осевое нормальное напряжение в точке б – $\sigma_{zb} = 23,586$ МПа. Радиальное нормальное напряжение в точке б – $\sigma_{rb} = 22,000$ МПа. Контактное касательное напряжение в точке б – $\tau_b = 0,937$ МПа.

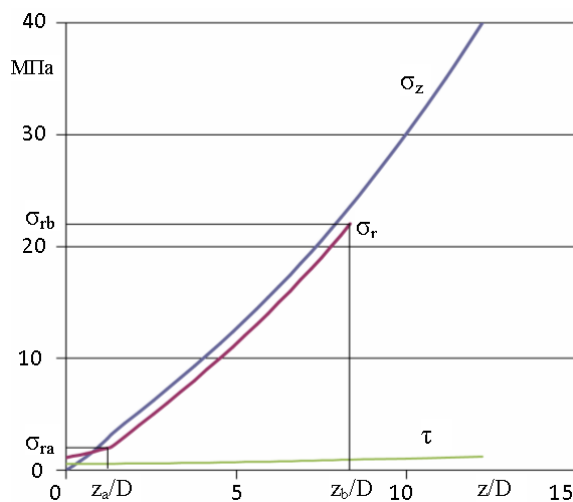


Рисунок 2. Диаграмма зависимостей параметров напряженного состояния в начале движения прессуемого материала в цилиндрическом канале фильеры

Диаграммы на рисунке 2 с большой точностью совпадают с диаграммами распределения напряжений в цилиндрической фильере, полученными решением уравнения (1) с использованием зависимостей (29), (30) и (31).

Полученное решение задачи является универсальным и не зависит от характера изменения предела текучести и коэффициента трения. Точность решения можно увеличить уменьшением шага аппроксимации.

Данный материал может быть использован для разработки методики расчета сопротивления фильеры кольцевой матрицы пресс-гранулятора. Полученные результаты позволяют разработать универсальную методику расчета прессующих механизмов, которая может быть использована для оптимизации прессующих механизмов грануляторов, не накладывая ограничений на характер изменения физико-механических свойств прессуемого материала. Статья может быть полезна научным работникам и конструкторам, работающим в области исследования процессов экструдирования и проектирования прессующего оборудования.

16.11.2012

Список литературы:

1. Гомонай, М. В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы : монография / М. В. Гомонай. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. – 68 с.
2. Полищук, В. Ю. Гранулирование комбикорма в фильерах при периодическом режиме прессования / В. Ю. Полищук, А. Я. Соколов // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1980. – № 6. – С. 97–100.
3. Полищук, В. Ю. Определение необходимого давления выпрессовывания комбикорма в фильерах с криволинейной образующей каналов / В. Ю. Полищук, А. Я. Соколов // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1978. – № 5. – С. 117–121.
4. Полищук, В. Ю. Определение необходимого давления выпрессовывания материала через фильеры кольцевой матрицы / В. Ю. Полищук // Модернизация существующего и разработка новых видов оборудования для пищевой промышленности. – М. : МТИПП, 1977. – С. 113–122.

5. Унксов, Е. П. Инженерная теория пластичности / Е. П. Унксов. – М. : Машгиз, 1959. – 328 с.
6. Кучинскас, З. М. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов / З. М. Кучинскас, В. И. Особов, Ю. М. Фрегер. – М. : Агропромиздат, 1988. – 207 с.

Сведения об авторах:

Полищук Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и пищевых производств Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор
Ханин Виктор Петрович, преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент
Панов Евгений Игоревич, аспирант кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств Оренбургского государственного университета
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, e-mail: mahpp@mail.osu.ru
Медведева Юлия Вячеславовна, ассистент кафедры обще-профессиональных дисциплин Оренбургского института путей сообщения, филиала СамГУПС, e-mail: yulenska84@mail.ru

UDC 674.08:662.818

Polischuk V.Yu.¹, Khanin V.P.¹, Panov E.I.¹, Medvedeva Yu.V.²

¹Orenburg state university; ²Orenburg Railway Engineering Institute, the Branch of the Samara State Transport University; e-mail: mahpp@mail.osu.ru; yulenska84@mail.ru

TENSION OF THE WOOD SAWDUST IN THE CYLINDRICAL CHANNEL UPON TRANSITION FROM THE REST CONDITION AT THE MOVEMENT

Methods of the theory of plasticity investigated a tension of a material, extruded in the cylindrical die channel, for a case of a random changes of a limit of fluidity and factor of a contact friction.

Key words: granulation, bio-energetic, wood sawdust, fuel granules, pellets.

Bibliography:

1. Gomonay, M. V. Production of fuel briquettes. Wood raw materials, equipment, technologies, operating modes : monograph / M. V. Gomonay. – Moscow, 2006. – 68 p.
2. Polischuk, V. Yu. A compound feed granulation in die channel at a periodic mode of pressing / V. Yu. Polischuk, A. Ya. Sokolov // News of institute of higher education. Food technology. – 1980. – № 6. – P. 97–100.
3. Polischuk, V. Yu. Determination of necessary pressure of a squeezing of an animal feed into the die channel with curvilinear forming channels / V. Yu. Polischuk, A. Ya. Sokolov // News of institute of higher education. Food technology. – 1978. – № 5. – P. 117–121.
4. Polischuk, V. Yu. Determination of necessary pressure of a squeezing of a material through the die channel / V. Yu. Polischuk // Modernization existing and development of new types of the equipment for the food industry. – Moscow, 1977. – P. 113–122.
5. Unksov, E. P. Engineering theory of plasticity / E. P. Unksov. – Moscow, 1959. – 328 p.
6. Kuchinskaskas, Z. M. The equipment for drying, granulation and briquetting of the feeds Z. M. Kuchinskaskas, V. I. Osobov, Yu. M. Freger. – Moscow, 1988. – 207 p.