

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ НА РОТОРНЫХ ПРЕССАХ С ПЛОСКОЙ МАТРИЦЕЙ

*В.И.Назаров, доцент, Д.А. Макаренков, доцент, И.А.Булатов, аспирант  
кафедра ЮНЕСКО «Техника экологически чистых производств»  
Московский государственный университет инженерной экологии  
e-mail: nazarov\_vi41@mail.ru*

**Р**азработана методика расчета энергосиловых параметров роторных прессов с плоской матрицей, учитывающая изменения реологических свойств перерабатываемых материалов, которые происходят вследствие термонагрева и использования в матрице каналов переменного сечения.

*The method for calculating the energy-force parameters of rotary presses with a flat matrix, taking into account the changes of rheological properties of processed materials, which occur due to thermal heating and the use of a matrix with channels of variable section.*

**Ключевые слова:** опилки, комбикорм, древесные отходы, роторный пресс, древесные топливные гранулы.

**Key words:** sawdust, mixed fodder, wood waste, rotary press, wood fuel granules. g.

При гранулировании отходов растительного происхождения (лузги подсолнечника, шелухи, отходов элеваторов, костры льна, соломы) в производстве комбикормов и топливных гранул широко применяются роторные пресса с кольцевыми или плоскими матрицами.

В кольцевых прессах узел прессования представляет собой непосредственно кольцевую матрицу, закрепленную в бандажных кольцах, с размещенными внутри прессующими роликами. При этом реализуются два варианта: кольцевая матрица вращается, а блок роликов остается неподвижным или наоборот – неподвижная матрица и вращающийся блок роликов.

Недостатками прессов с кольцевыми матрицами является усложнение конструкции за счет наличия механизма принудительной подачи материала во внутреннюю полость матрицы, сложность и дороговизна изготовления матрицы, повышенный износ матрицы и роликов вследствие неравномерного, скачкообразного питания сырьем.

Наряду с кольцевой матрицей все большее применение находят грануляторы с плоской матрицей [1]. В МГУ инженерной экологии разработана конструкция гранулятора с плоской матрицей, подпружиненными роликами, имеющими возможность перемещения вдоль оси вертикального вала, и верхним расположением привода. [2].

Схема прессования гранул прокатываемыми роликами представлена на рис. 1. В процессе прокатки сырье запрессовывается в каналы вращающимися роликами. После прохождения ролика над каналом в нем происходит уплотнение и продвижение очередной порции материала в свободный объем. Затем в канал поступает следующая порция сыпучего материала.

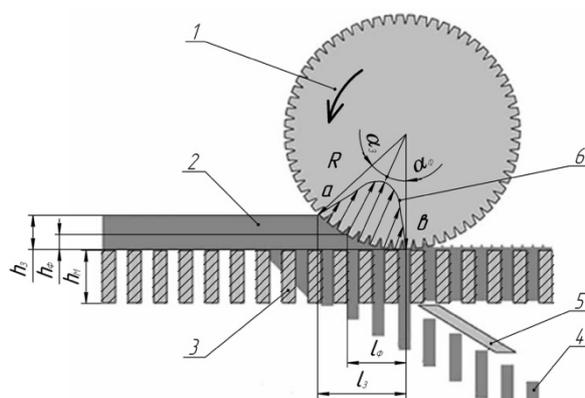


Рис. 1 Схема продавливания материала через каналы матрицы: 1 – валок; 2 – материал; 3 – матрица; 4 – гранулы; 5 – нож; 6 – эпюра напряжений.

Прессы с плоской матрицей обладают простотой конструкции, удобством эксплуатации и обслуживания, длительным сроком непрерывной эксплуатации и относительной простотой в производстве матриц. При изготовлении матриц каналы в них выполняют как с постоянным так и с переменным сечением. Наши исследования показали, что использование каналов переменного сечения а также непосредственный нагрев самой матрицы позволяют изменить реологические свойства перерабатываемых веществ – сделать их более пластичными и тем самым снизить энергозатраты процесса гранулирования в целом.

Так, например, применение нагрева в процессе прессования древесных опилок приводит к резкому снижению удельных давлений при высокой плотности и прочности получаемых цилиндрических гранул. Из графика зависимости плотности от температуры (рис. 2 кривая 2) видно, что с ростом температуры плотность гранул изменяется незначительно и в среднем равна  $1300 \text{ кг/м}^3$ . При этом удельное давление

прессования сильно снижается в диапазоне температур от 100 до 200°C (рис. 2 кривая 1). При давлении 40-60 МПа плотность прессовок составляет ~1300 кг/м<sup>3</sup>, в отличие от прессования в цилиндрическом канале, где средняя величина удельного давления  $P_{уд} = 110-140$  МПа.

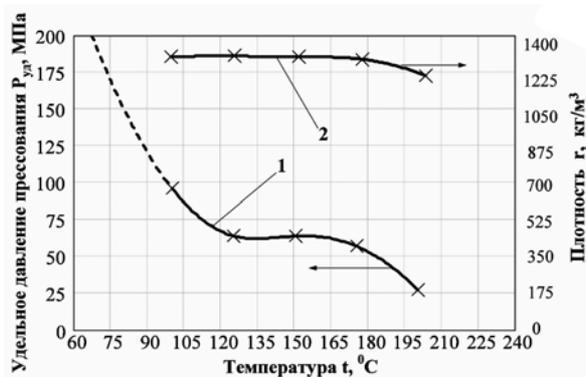


Рис. 2 Зависимость изменения плотности прессовок и удельного давления прессования от температуры нагрева для березовых опилок: 1 –  $P_{уд} = f(t)$ ; 2 –  $\rho = f(t)$ .

Древесные опилки являются сложной реологической системой, содержащей целлюлозу, лигнин, растворимые в воде сахара и смолы. При нагреве происходит деструкция этих компонентов с образованием жидкой пластифицированной фазы. В диапазоне температур от 75 до 200°C опилки последовательно переходят из сыпучей среды в сыпучепластичную и в условнопластичную.

В качестве обобщенной характеристики реологических свойств опилок различной природы была выбрана зависимость пластической прочности от температуры нагрева, полученная

экспериментально (рис. 3). Как видно из рис. 3 пластическая прочность в диапазоне температур 90-160°C, в зависимости от состава веществ, входящих в структуру, может расти (кривая 1), падать (кривая 4) и оставаться практически неизменной (кривые 2 и 3).

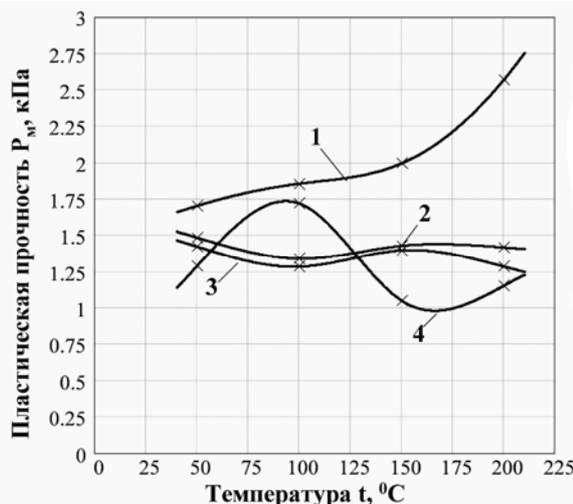


Рис. 3 Зависимость пластической прочности от температуры: 1 – березовые опилки; 2 – сосновые опилки свежие; 3 – сосновые опилки из бруса; 4 – опилки ДСП.

С учетом реологических характеристик перерабатываемого материала был выбран геометрический профиль формирующего канала (см. рис. 4). Канал разделен на три участка длиной  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$ . Было принято, что  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  – давления, соответственно, на входе и выходах с участков  $l_1$ ,  $l_2$ , и  $l_3$ ;  $T$  – сила трения;  $P_δ$  – давление на боковую поверхность материала;  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры канала на первом и третьем участках.

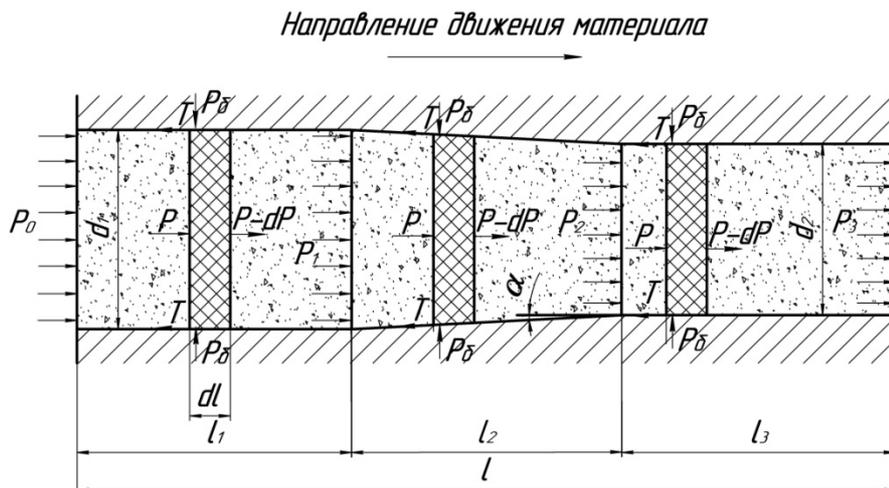


Рис. 4 Схема сил, действующих на материал в канале матрицы.

Рабочий участок ( $l_2$ ) обеспечивает основное противодействие со стороны сужающегося конического канала. Угол раскрытия конуса  $2\alpha$  равен 2-4 градуса. Цилиндрический участок ( $l_3$ ) формирует гранулы. Записав условия равно-

весия всех действующих сил на первом, втором и третьем участках и проведя соответствующие преобразования, было получено уравнение для определения давления по длине канала [2].

$$P_3 = P_0 \cdot \exp \left( 2f \cdot \xi \cdot \operatorname{ctg} \varphi \cdot \ln \left( 1 - 2 \sin \varphi \frac{\ell_2}{d_1} \right) - 4f \cdot \xi \left( \frac{\ell_1}{d_1} + \frac{\ell_3}{d_2} \right) \right) \quad (1)$$

Из уравнения (1) видно, что для уменьшения потери давления на продавливание материала через канал матрицы необходимо стремиться к уменьшению длины канала, коэффициента внешнего трения  $f$  и коэффициента бокового давления  $\xi$ . Уменьшение диаметра канала, напротив, приведет к росту потерь давления.

Уравнение (1) позволяет определить условия формирования дисперсных сред и устанавливает связь между геометрическими размерами канала матрицы и свойствами гранулируемой системы. При этом величина  $\xi$  зависит от величины пластической прочности  $P_m$ . Коэффициент бокового давления равен  $\xi \approx 0.3 - 0.9$ , а коэффициент внешнего трения принимается равным  $0.25 - 0.53$  [3]. Величина удельного давления прессования определяется из номограмм, рис. 5. Так например для угла  $\alpha = 3^\circ$  и температуры нагрева  $120^\circ\text{C}$  величина  $P_0 = 87.039$  МПа.

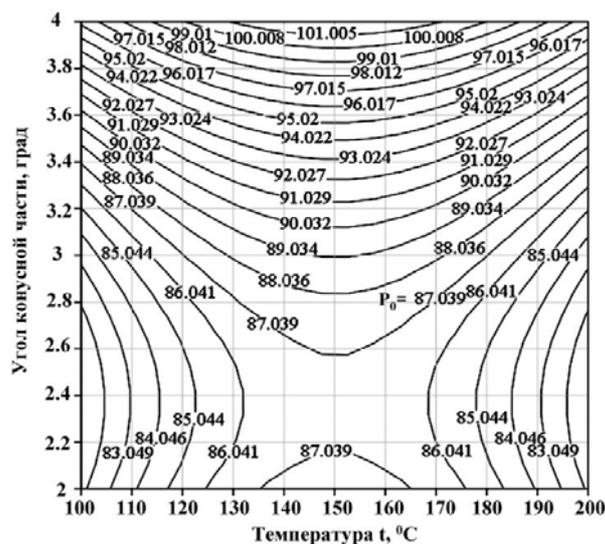


Рис. 5. Номограмма для определения удельного давления прессования  $P_0$  в зависимости от температуры и угла конусной части канала проходного прессования для свежих сосновых опилок.

По результатам исследований была разработана методика расчета основных параметров процесса гранулирования на роторном грануляторе с плоской матрицей. Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Сначала задаются исходные данные гранулируемого продукта:

Насыпная плотность  $\rho_{нас}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ; производительность  $Q$ ,  $\text{кг}/\text{ч}$ ; исходная влажность массы  $W$ , масс. %; требуемая плотность гранул  $\gamma$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ; диаметр формующего канала матрицы  $d$ , м; длина формующего канала матрицы  $\ell$ , м; количество формующих роликов  $z$  (обычно  $z = 3$ ); угол конической части  $\alpha$ , град.; коэффициент

внешнего трения  $f$ ; температура нагрева прессформы  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ ; коэффициент бокового давления  $\xi$ ; частота вращения вала привода  $n$ ,  $\text{об}/\text{мин}$ ; живое сечение матрицы  $\varphi$  (как правило  $\varphi = 23-30\%$ ); удельное давление прессования  $P_0$ , МПа (определяется по номограмме рис. 5); пластическая прочность  $P_m$ , кПа (определяется из рис. 3).

Затем определяются угол естественного откоса (внутреннего трения)  $\varphi_1$ , угол внешнего трения  $\varphi_2$ , коэффициент внутреннего трения  $f_1$ , угол формования  $\alpha_\phi$  (как правило  $\alpha_\phi \approx 2^\circ$ ), угол захвата материала  $\alpha_3 = \varphi_1 + \varphi_2$  и коэффициент, учитывающий реологические характеристики материала  $C_M = P_M^{\max} / P_M^{\min}$ .

## 2. Расчетные данные.

а) Определение основных геометрических характеристик.

Сначала определяется объемная производительность гранулятора,  $\text{м}^3/\text{мин}$

$$Q_{об} = \frac{Q}{60 \cdot \rho_{нас}} \quad (2)$$

Площадь сечения одного отверстия,  $\text{м}^2$

$$S_o = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3)$$

Число отверстий в формующей матрице

$$m = \frac{Q_{об}}{z \cdot S_o \cdot n \cdot l} \quad (4)$$

Расчетный диаметр матрицы (м) определяют по формуле:

$$D_{рас} = \sqrt{\frac{d^2 \cdot m}{\varphi}} \cdot 100 \quad (5)$$

Радиус формующего ролика (м) определяют по зависимости:

$$R = \frac{Q}{120 \cdot \pi \cdot z \cdot n \cdot \rho_{нас} \cdot (r_n^2 - r_{вн}^2) \sin^2(\alpha_\phi/2) \cdot C_M} \quad (6)$$

где  $r_n$  и  $r_{вн}$  — радиусы поверхности матрицы, описываемые наружным и внутренним торцами ролика соответственно, м.

Длину ролика (м) рассчитывают как:

$$L_{рол} = \frac{D_{рас}}{2} \quad (7)$$

Число отверстий с учетом шага между ними  $t$  на каждом диаметре их расположения

$$m_t = \frac{\pi \cdot D_n}{t} \quad (8)$$

Площадь рабочей поверхности матрицы,  $\text{м}^2$

$$S = S_n - S_{вн} = \pi(r_n^2 - r_{вн}^2) \quad (9)$$

Расчетное живое сечение матрицы

$$\varphi = \frac{S_o \cdot m_t}{S} \quad (10)$$

б) Определение параметров предельного состояния.

Определяется предельная скорость вращения вала, об/мин

$$n_{\max} \leq 30 \sqrt{\frac{f}{4 \cdot R}} \quad (11)$$

При этом максимальная часовая производительность гранулятора (т/ч) равна

$$Q_{\max} = 120 \cdot \pi \cdot z \cdot n_{\max} \cdot \rho_{\text{нас}} \times R \cdot (r_n^2 - r_{\text{вн}}^2) \sin^2(\alpha_\phi / 2) \cdot C_M$$

в) На этом этапе определяют силовые параметры процесса формования.

Среднее нормальное напряжение (МПа) рассчитывают по зависимости:

$$\sigma_b^{\max} = P_{\text{уд}} (1 + 2\xi)(1 + \sin \varphi_1) + P_m \cdot \sin \varphi_1 \quad (13)$$

Результирующий момент формования (Н·м) определяется по формуле:

$$M_\phi = \frac{L \cdot R^2 \cdot f}{2} \cdot \sigma_b^{\max} (\alpha_3 - 2\alpha_\phi) \quad (14)$$

Момент сопротивления при сдвиге избытков материала (Н·м) рассчитывают по формуле:

$$M_c = \frac{42P_m \cdot \pi \cdot R^3}{ctg(\varphi_1)} \quad (15)$$

Результирующую силу давления на валки (МН) можно определить из выражения:

$$P = \frac{L_{\text{рол}} \cdot R \cdot \alpha_3}{2} \cdot \sigma_b^{\max} \quad (16)$$

Угловая скорость вращения роликов ( $c^{-1}$ ) равна:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (17)$$

Мощность привода гранулятора (кВт) равна:

$$N = \frac{z \cdot (M_\phi + M_c) \cdot \omega}{\eta}, \text{ где } \eta = 0.95 - \text{КПД} \quad (12)$$

Мощность затрачиваемая на нагрев шихты  $N_n$  (кВт) определяется по стандартной методике [5].

Установочная мощность привода (кВт) равна:

$$N = \frac{(N + N_n) \cdot 1.2}{\eta} \quad (18)$$

Приведенная нами методика позволяет производить расчет основных энергосиловых параметров прессов с плоской матрицей, используемых для переработки различных типов растительных отходов (лузги подсолнечника, шелухи, отходов элеваторов, костры льна, соломы), для производства комбикормов и топливных гранул из древесных опилок. При этом данная методика учитывает изменение реологических свойств перерабатываемых материалов вследствие их термонагрева и использования каналов переменного сечения.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Булатов, И. А. Разработка процесса гранулирования древесных топливных гранул методом прокатки на роторных прессах / И. А. Булатов, В. И. Назаров // Инженерные и технологические исследования для устойчивого развития : Междунар. ИНТЕРНЕТ-Форум молодых ученых, аспирантов и студентов, М., 2005-2006 г.г. – <http://www.msuie.ru/unesco.forum/dokl/13.doc>.
2. Назаров, В. И. Особенности разработки процесса прессового гранулирования биотоплива на основе древесных и растительных отходов / В. И. Назаров, И. А. Булатов, Д. А. Макаренко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 2. – С. 35–39.
3. Глебов, И. Т. Резание древесины / И. Т. Глебов. – Екатеринбург : УГЛУ, 2001. – 151 с.
4. Казанков, Ю. В. Расчет и конструирование формующего инструмента / Ю. В. Казанков, В. А. Миронов, М. С. Макаров. – М. : МИХМ, 1986. – 84 с.