

## Связь мощности сил полезного сопротивления в прессующем механизме пресс-гранулятора с размерами прессующего механизма

*Е.И. Панов, к.т.н., В.Ю. Полищук, д.т.н., профессор,  
С.П. Василевская, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ*

Напряжённое состояние полуфабриката из зернового сырья во входной конической полости матрицы пресс-гранулятора описано с использованием теории пластичности.

Конические полости на входе в фильеры матриц пресс-грануляторов компенсируют касательные напряжения на каналы матрицы. Установив сопротивление конических полостей экструдированию растительного полуфабриката, можно определить технико-экономические параметры пресс-грануляторов.

**Цель исследования** – выявление ранее неизвестных свойств прессующего механизма пресс-гранулятора с одним прессующим роликом большого диаметра.

**Материал, методы и результаты исследования.** Параметрический синтез прессующего механизма пресс-гранулятора с кольцевой матрицей предполагает исследование влияния на параметры процесса гранулирования радиусов рабочих органов – матрицы и прессующего ролика. Од-

ним из таких параметров является мощность сил полезного сопротивления. Для прессующего механизма с двумя прессующими роликами в кольцевой матрице этот вопрос был рассмотрен ранее [1]. Рассмотрим прессующий механизм пресс-гранулятора с одним прессующим роликом большого относительно радиуса матрицы размера, расположенным внутри кольцевой матрицы, и вычислительным экспериментом определим влияние радиусов рабочих органов на мощность сил полезного сопротивления. При этом используем результаты экспериментального исследования, выполненные на лабораторном стенде, на основе пресс-гранулятора ПГМ-05 [2].

Мощность сил полезного сопротивления в прессующем механизме можно найти из напряжённого состояния гранулируемого полуфабриката в рабочем пространстве матрицы и прессующего ролика. Схема этого пространства показана на рисунке 1.

По схеме видно, что рабочая поверхность кольцевой матрицы радиусом  $r_1$  приведена во вращение с угловой скоростью  $\omega$  относительно водила прессующего ролика. Внутри матрицы установлен прессующий ролик с радиусом рабочей поверх-

ности  $r_2$ . Ролик свободно вращается на водиле. Полуфабрикат для прессования подают на рабочую поверхность матрицы слоем, имеющим радиальную высоту  $h_0$ . Он начинает контактировать с роликом в радиальном сечении, имеющем координату  $s_0$ , где после прессования в пространстве между рабочими органами выдавливается через каналы фильер матрицы. Это приводит к возникновению больших сил полезного сопротивления на матрице. Угол пространства между матрицей и роликом  $\vartheta$  определен радиусом  $r_1$  и радиусом  $r_2$ , проходящими в точке поверхности ролика при радиальной высоте  $h$ , и текущей координате  $s$  (рис. 1).

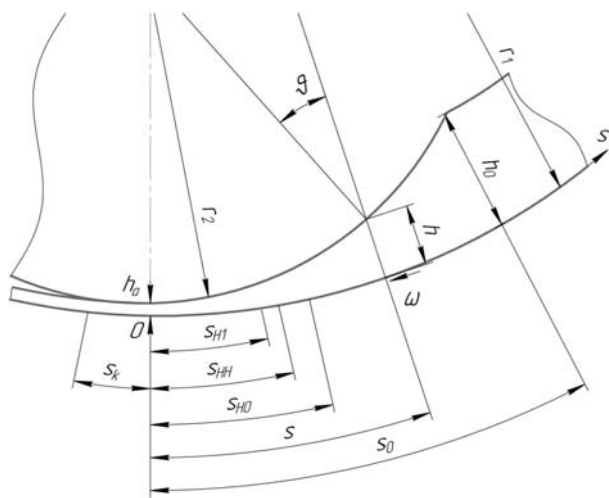


Рис. 1 – Схема рабочего пространства кольцевой матрицы и прессующего ролика

Установлено пластическое течение полуфабриката в направлении, противоположном движению рабочих органов в зоне отставания, которая расположена на входе полуфабриката в рабочее пространство между матрицей и роликом. В зоне отставания от рабочей поверхности матрицы на полуфабрикат действует напряжение сдвига  $\tau < 0$ . В зоне опережения, примыкающей со стороны входа полуфабриката к сечению минимальной высоты рабочего пространства  $h_a$  с координатой  $s=0$ , пластическое течение полуфабриката на-

правлено в ту же сторону, что вращение матрицы с роликом, т.е.  $\tau > 0$ .

Контакт полуфабриката с прессующим роликом заканчивается в сечении с координатой  $s_k$ . Здесь продолжает выполняться условие  $\tau > 0$ .

Зоны отставания и опережения разделены зоной выдавливания, где полуфабрикат поступает в каналы фильер. Протяжённость границ зоны выдавливания – от  $s_{н0}$  до  $s_{н1}$ . В этой зоне величина напряжения сдвига  $\tau$  на поверхностях рабочих органов постепенно снижается с наибольших величин на границах с зоной отставания и зоной опережения до нуля в нейтральном сечении зоны выдавливания с координатой  $s_{нн}$ .

Радиальная высота  $h$  рабочего пространства между матрицей и роликом зависит от координаты  $s$  следующим образом (рис. 1):

$$h = r_1 - (r_1 - r_2 - h_a) \cos \frac{s}{r_1} - \sqrt{r_2^2 - (r_1 - r_2 - h_a)^2 \sin^2 \frac{s}{r_1}} \quad (1)$$

Мощность сил полезного сопротивления прессующего механизма с одним прессующим роликом на ширине рабочего пространства  $b$  имеет вид:

$$N = \omega b r_1^2 \int_{s_k}^{s_0} \tau d \left( \frac{s}{r_1} \right), \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость кольцевой матрицы относительно водила роликов.

Оценим влияние на мощность сил полезного сопротивления увеличения радиуса рабочих органов при гранулировании древесных опилок. Рабочую поверхность матрицы пресс-гранулятора ПГМ-05 с  $r_1=0,0875$  м увеличим до проектного радиуса  $r_1=0,105$  м. При этом пропорционально увеличим радиус ролика.

При проведении вычислительного эксперимента используем параметры процесса и рабочих органов, приведённые в таблице 1.

Величина  $h_k$  получена из натурального эксперимента, описанного в ранее опубликованных материалах [2–7]. Эксперимент выполнен на лабораторной

1. Геометрические параметры, использованные в вычислительном эксперименте

Параметр	ПГМ-05	Проект	
Рабочая поверхность матрицы радиуса $r_1$ , м	0,0875	0,105	
Отношение радиусов рабочих поверхностей ролика и матрицы $r_2/r_1$	0,777		
Рабочая поверхность ролика радиуса $r_2$ , м	0,068	0,0815	
Минимальное расстояние между матрицей и роликом $h_a$ , м	0,004		
Высота слоя полуфабриката на границе контакта с роликом $h_k$ , м	0,005937		
Рабочая поверхность матрицы единичной ширины $b$ , м	0,01		
Величина координаты начала контакта полуфабриката с роликом, м	$s_{01}$	0,13	0,16
	$s_{02}$	0,16	0,2
	$s_{03}$	0,19	0,23
	$s_{04}$	0,21	0,26
	$s_{05}$	0,24	0,29
	$s_{06}$	0,27	0,32

установке, включавшей пресс-гранулятор ПГМ-05 с прессующим роликом, оборудованным измерителем давления с использованием патента РФ № 2588925 [3, 8].

Применённая единичная ширина  $b$  даёт возможность не связывать полученные результаты с шириной рабочей поверхности матрицы.

Величины  $s_{01}, \dots, s_{06}$  задают уровень заполнения рабочего пространства пресс-гранулятора полуфабрикатом.

Физико-механические свойства полуфабриката и параметры его напряжённого состояния приведены в таблице 2 [2, 9, 10].

Вычисления выполнены средствами электронных таблиц MS Excel.

Мощность сил полезного сопротивления вычислялась для единичной ширины рабочего пространства. Рабочее пространство делится (рис. 1) на зону опережения на отрезках координат  $[s_k; 0]$  и  $[0; s_{H1}]$ , зону выдавливания на отрезке  $[s_{H1}; s_{H0}]$  и зону отставания на отрезке  $[s_{H0}; s_0]$ .

Из результатов натурального эксперимента определена протяжённость отрезка  $[s_k; 0]$ . У ПГМ-05  $s_k = 0,04$  м. Приравнивая высоту  $h_k$  у ПГМ-05 и у проекта по зависимости (1), можно найти у проекта  $s_k = 0,0425$  м.

Аналитический способ вычисления напряжений в полуфабрикате на отрезке  $[s_k; 0]$  отсутствует, поэтому сделаем предположение, что на этом отрезке напряжение сдвига  $\tau_k$  определено средней величиной нормальных напряжений в полуфабрикате в виде:

$$\tau_k = -\tau_{TO} \exp\left(\beta \frac{\sigma_a}{2}\right). \quad (3)$$

Знак « $\rightarrow$ » формулы (4) указывает направление напряжения  $\tau_k$  по оси  $s$ .

Силы полезного сопротивления на отрезке  $[s_k; 0]$  развивают мощность, равную:

$$N_k = 1000\tau_k s_k b \omega r_1. \quad (4)$$

У ПГМ-05  $N_k = -1,02$  кВт, у проекта  $N_k = -1,3$  кВт. Знак « $\rightarrow$ » показывает, что полуфабрикат отдаёт мощность матрице пресс-гранулятора.

На отрезке  $[0; s_{H1}]$  вначале определяется граница  $s_{H1}$ . Для её определения использована зависимость для вычисления напряжения [2]:

$$\sigma_{si} = -\frac{1}{\beta} \ln \left[ \exp(-\beta \sigma_{sa}) - \beta \tau_{TO} \sum_1^i \Phi_i \Delta s \right], \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

Коэффициент  $\Phi_i$  определён зависимостью [2]:

$$\Phi_i = \frac{2r_1 - h_i + tg^2 \vartheta_i}{r_1 - h_i} \cdot \frac{r_1 - r_2 - h_a}{r_1} \sin \frac{s_i}{r_1} \left[ 1 + \frac{2(r_1 - r_2 - h_a) \cos \frac{s_i}{r_1}}{\sqrt{r_2^2 - (r_1 - r_2 - h_a)^2 \sin^2 \frac{s_i}{r_1}}} \right]. \quad (6)$$

Угол  $\vartheta_i$  определён в виде:

$$\vartheta_i = \arcsin \left( \frac{r_1 - r_2 - h_a}{r_2} \sin \frac{s_i}{r_1} \right). \quad (7)$$

Принят шаг интегрирования  $\Delta s = 0,001$  м. Численное интегрирование выполнялось по методу трапеций. Коэффициент  $\Phi_i$  был вычислен для середины  $i$ -го участка. Для повышения точности нахождения координаты  $s_{H1}$  шаг интегрирования, содержащий напряжение  $\sigma_{H1}$ , был разделён ещё на 10 частей для определения координаты  $\sigma_{H1}$ . В результате найдено у ПГМ-05  $s_{H1} = 0,019259$  м, у проекта  $s_{H1} = 0,018961$  м.

Предельное напряжение сдвига  $\tau_i$  на матрице  $[0; s_{H1}]$  для отрезка на каждом шаге интегрирования определено выражением [2]:

$$\tau_i = -\tau_{TO} \exp \left[ 0,5\beta \left( \sigma_{si} + \sigma_{s(i+1)} \right) \right], \quad 1 \leq i \leq n$$

$$\sigma_{s(n+1)} = \sigma_{H1}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{si}$  и  $\sigma_{s(i+1)}$  – нормальные напряжения соответственно в начале и в конце  $i$ -го шага интегрирования.

Знак « $\rightarrow$ » перед (9) определяет направление  $\tau_i$  относительно оси  $s$ .

Силы полезного сопротивления на единичной ширине отрезка  $[0; s_{H1}]$  развивают мощность  $N_1$ , которая определяется выражением:

$$N_1 = 1000b\omega r_1 \left\{ \Delta s_1 \sum_{i=1}^{n-1} \tau_{in} + [s_{1H} \Delta s_1 (n-H)] \tau \right\}. \quad (9)$$

У ПГМ-05  $N_1 = -0,665$  кВт. У проекта  $N_1 = -0,785$  кВт. Знак « $\rightarrow$ » показывает, что мощность передаётся от полуфабриката матрице гранулятора. Мощность сил полезного сопротивления в зоне выдавливания для отрезка координат  $[s_{H1}; s_{H0}]$  примем равной нулю [4].

На отрезке  $[s_{H0}; s_0]$  в начале определяется граница  $s_{H0}$ . Для её определения использована зависимость для вычисления напряжения [2]:

## 2. Физико-механические параметры гранулирования

Параметр	ПГМ-05	Проект
Предел текучести сдвига при атмосферном давлении $\tau_{TO}$ , МПа	1,35	0,02
Коэффициент, учитывающий всестороннее давление $\beta$ , МПа <sup>-1</sup>	19,9	7,8
Угловая скорость вращения матрицы $\omega$ , рад/с	28,5	28,5
Нормальное напряжение в сечении с минимальным зазором матрицы и ролика $\sigma_a$ , МПа	28,5	28,5
Нормальное напряжение в сечении границы зон отставания и выдавливания $\sigma_{H0}$ , МПа	28,5	28,5
Нормальное напряжение в сечении границы зон выдавливания и опережения $\sigma_{H1}$ , МПа	28,5	28,5

$$\sigma_{si} = -\frac{1}{\beta} \ln \left[ 1 + \beta \tau_{T0} \sum_1^i \Phi_i \Delta s \right], \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

Принят шаг интегрирования  $\Delta s_1 = 0,005$  м. Численное интегрирование выполнялось по методу трапеций. Коэффициент  $\Phi_i$  вычислен для середины  $i$ -го участка. Для повышения точности нахождения  $s_{n0}$  шаг интегрирования, содержащий  $\sigma_{n0}$ , был разделён ещё на 10 частей для определения координаты  $\sigma_{n0}$ . Вычисленные границы  $s_{n0}$  показаны в таблице 3.

Напряжение сдвига на поверхности матрицы  $\tau_i$  для отрезка  $[s_{n0}; s_0]$  на каждом шаге интегрирования, как и (8), имеет вид:

$$\tau_i = \tau_{T0} \exp \left[ \beta \frac{\sigma_{si} + \sigma_{s(i+1)}}{2} \right], \quad 1 \leq i \leq n, \quad (11)$$

$$\sigma_{s(n+1)} = \sigma_{n0}.$$

Силы полезного сопротивления имеют мощность  $N_0$  единичной ширины зоны выдавливания  $[s_{n0}; s_0]$ , описанную выражением:

$$N_0 = 1000 b \omega r_1$$

$$\left\{ \Delta s \sum_{i=1}^{n-1} \tau_{iH} + [s_0 - s_{n0} - \Delta s \cdot 1 \cdot (n-1)] \tau \right\}. \quad (12)$$

### 3. Границы зоны отставания

ПГМ-05		Проект	
$s_0, \text{ м}$	$s_{n0}, \text{ м}$	$s_0, \text{ м}$	$s_{n0}, \text{ м}$
0,13	0,044459	0,16	0,055839
0,16	0,051498	0,2	0,064459
0,19	0,057155	0,23	0,06951
0,21	0,060406	0,26	0,073892
0,24	0,064782	0,29	0,077823
0,27	0,068985	0,32	0,081539

Полная мощность сил полезного сопротивления для единичной ширины рабочего пространства  $N$  задана зависимостью:

$$N = N_0 + N_1 + N_k. \quad (13)$$

Вычисленная мощность, развиваемая силами полезного сопротивления в зависимости от  $s_0$ , представлена на рисунке 2.

Анализ диаграмм на рисунке 2 показывает, что увеличение радиусов рабочих органов на 20% приводит к сравнительно небольшому увеличению мощности сил полезного сопротивления на 0,26–0,51 кВт, или от 19,4 до 12,7% при увеличении  $s_0$ . Однако диапазон увеличения сил полезного сопротивления проекта значительно выше за счёт увеличения диапазона  $s_0$ .

Оценить мощность сил полезного сопротивления можно относительной высотой свободного от давления рабочих органов слоя полуфабриката

$$\kappa = (h_0 - h_a) / r_2. \quad (14)$$

Вычисленная мощность, развиваемая силами полезного сопротивления в зависимости от  $\kappa$ , представлена на рисунке 3.

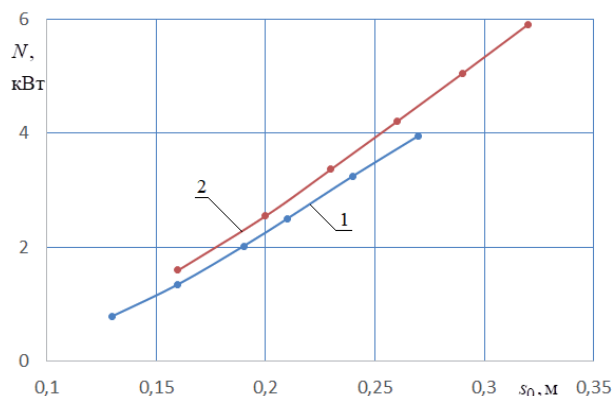


Рис. 2 – Диаграммы зависимостей сил полезного сопротивления на единичной ширине рабочей поверхности матрицы от координаты начала контакта полуфабриката с прессующим роликом: 1 – ПГМ-05; 2 – проект

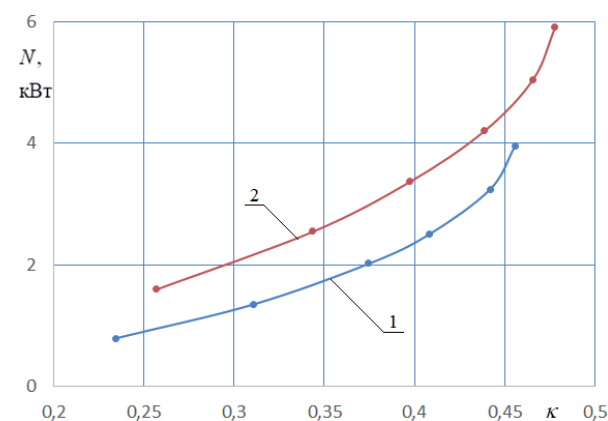


Рис. 3 – Диаграммы зависимостей сил полезного сопротивления на единичной ширине рабочей поверхности матрицы от относительной высоты свободного от давления рабочих органов слоя полуфабриката: 1 – ПГМ-05; 2 – проект

Из анализа диаграмм на рисунке 3 следует, что мощность сил полезного сопротивления резко возрастает при  $\kappa > 0,408$  для ПГМ-05, при  $\kappa > 0,438$  – для проекта. Следовательно, не имеет смысла излишне заполнять рабочее пространство полуфабрикатом.

**Вывод.** Увеличение радиусов рабочих органов на 20% может быть целесообразно при ограничении подачи полуфабриката в рабочее пространство пресс-гранулятора.

### Литература

1. Карташов Л.П., Полищук В.Ю. Системный синтез технологических объектов АПК. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 185 с.
2. Панов Е.И., Полищук В.Ю., Ханин В.П. Предельное напряжение сдвига древесных опилок, прессуемых между матрицей и роликом гранулятора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 1. С. 17–23.
3. Пат. 2588925. Российская Федерация, МПК В30В11/20 (2006.01), В30В15/00 (2006.01), G01L1/04 (2006.01), G01L9/04 (2006.01). Прессующий ролик пресс-гранулятора / Е.И. Панов, В.Ю. Полищук, В.П. Ханин; заяв. и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет». № 2015102977/02; заявл. 29.01.2015; опубл. 10.07.2016; Бюл. № 19. 11 с.

4. Панов Е.И., Полищук В.Ю., Ханин В.П. Уточнение напряжённого состояния древесных опилок в зоне выдавливания гранулятора с кольцевой матрицей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 1. С. 224–228.
5. Полищук В.Ю., Соколов А.Я. Гранулирование комбикорма в цилиндрических каналах фильер при непрерывном режиме процесса прессования // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1980. № 1. С. 67–71.
6. Полищук В.Ю., Соколов А.Я. Гранулирование комбикорма в фильерах при периодическом режиме прессования // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1980. № 6. С. 97–100.
7. Полищук В.Ю. Определение давления выпрессовывания в конических фильерах кольцевой матрицы пресса для гранулирования кормов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1976. № 3. С. 113–118.
8. Сафонов А.О. Влияние технологических параметров на энергетическую плотность древесных пеллет // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2–1 (13–1). С. 430–433.
9. Панов Е.И. Обоснование параметров прессующего механизма пресс-гранулятора для переработки измельчённой древесины: дисс. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2017. 149 с.
10. Дорняк О.Р., Свиридов Л.Т. Математическое моделирование процесса прессования древесины в различных направлениях механической анизотропии // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2005. № 5. С. 85–92.