

УДК 664.7:631.363.28:621.979.2

UDC 664.7:631.363.28:621.979.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВАЛЬЦОВО-МАТРИЧНОМ ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРЕ С ТОРЦЕВЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ КЛИНОВИДНОГО ПРОСТРАНСТВА

MATHEMATICAL MODELING OF WORKING PROCESS IN ROLLER-DIE PELLET MILL WITH BUTT RESTRICTION OF WEDGE-SHAPED SPACE

Ковриков Иван Тимофеевич
заслуженный деятель науки и техники РФ,
д.т.н., профессор

Kovrikov Ivan Timofeevich
deserved scientist of the Russian Federation,
Dr.Sci.Tech., professor

Кириленко Александр Сергеевич
ведущий инженер
*Оренбургский государственный университет,
Оренбург, Россия*

Kirilenko Alexander Sergeevich
principal engineer
Orenburg State University, Orenburg, Russia

В статье обосновано направление совершенствования рабочего процесса вальцово-матричных пресс-грануляторов с кольцевой матрицей путем торцевого ограничения клиновидного пространства дополнительными контактными поверхностями. Представлена математическая модель процесса прессового гранулирования растительного сырья в условиях замкнутого клиновидного пространства между матрицей и каждым из прессующих роликов. На основе анализа математической модели показана возможность существенного повышения производительности и снижения энергоемкости пресс-грануляторов, имеющих дополнительные контактные поверхности в виде ограничительных колец

In this article, the direction of an improvement of the working process of roller-die pellet mills with a ring dies by butt restriction of wedge-shaped space by additional contact surfaces is proved. The mathematical model of the process of pressure granulation (pelleting, extrusion agglomeration) of plant raw materials in the conditions of the closed wedge-shaped space between a die and each of press rollers is presented. On the basis of the analysis of the mathematical model possibility of significant increase of capacity and decrease in energy intensity of pellet mills having additional contact surfaces in the form of restrictive rings is shown

Ключевые слова: ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОР, ПРЕССОВОЕ ГРАНУЛИРОВАНИЕ, БОКОВОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ, ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫЕ КОЛЬЦА, ТОРЦЕВЫЕ КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ, ЗАМКНУТОЕ КЛИНОВИДНОЕ ПРОСТРАНСТВО, ПЛОСКОЕ ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Keywords: PELLET MILL, PRESSURE GRANULATION (PELLETING, EXTRUSION AGGLOMERATION), LATERAL EXTRUSION, RESTRICTIVE RINGS, BUTT CONTACT SURFACES, CLOSED WEDGE-SHAPED SPACE, PLANE DEFORMED STATE

В условиях модернизации и технологического обновления производства большое значение приобретает отвечающее критериям ресурсосбережения и энергоэффективности совершенствование широко используемых в промышленности сложных технологических процессов.

В АПК одним из таких процессов является прессовое гранулирование предварительно измельченных растительных материалов в пресс-грануляторах выдавливающего (экструзионного) типа с цилиндрическими рабочими органами. В России и за рубежом наиболее распространены вальцово-матричные пресс-грануляторы, состоящие из

установленной на планшайбе активной кольцевой матрицы с внутренней цилиндрической поверхностью, контактируемой с прессуемым материалом, и размещенных внутри нее пассивных прессующих роликов (вальцов) [1], [2].

Одним из целесообразных путей совершенствования процесса прессового гранулирования является разработка новых и оптимизация существующих конструкций пресс-грануляторов. Однако обзор научных документов дает основание полагать, что за последнее двадцатилетие конструкции отечественных [1], [3] и зарубежных [1], [4], [5], [6] прессующих механизмов с кольцевой матрицей хотя и достигли более высокого технического уровня, но по структурным признакам изменились незначительно.

Из анализа напряженно-деформированного состояния прессуемого материала в незамкнутом клиновидном пространстве (условно разделенном на зону отставания, зону выдавливания в фильеры и зону опережения) между матрицей и каждым из прессующих роликов следует, что для рабочего процесса всех существующих и вновь проектируемых пресс-грануляторов с кольцевой матрицей характерно боковое выдавливание продукта. Боковое выдавливание – перемещение материала в направлении торцов рабочих органов и его выдавливание за пределы области контакта – особенно выражено в зоне отставания и менее интенсивно в зоне выдавливания в фильеры матрицы. Интенсивность поперечного течения материала определяется его напряженным состоянием в клиновидном пространстве, а также существенно зависит, как и само напряженное состояние, от ряда факторов: структурно-механических (реологических) свойств обрабатываемого продукта (предела текучести при сжатии, коэффициента контактного трения), конструктивных параметров пресс-гранулятора.

В результате бокового выдавливания материала значительно снижается производительность пресс-гранулятора. Часть материала, выдавленная за пределы рабочей области, поступает на повторное сжатие, что увеличивает энергозатраты на гранулирование. При совершенствовании процесса гранулирования в пресс-грануляторах с кольцевой матрицей процесс бокового выдавливания и связанные с ним недостатки до сих пор не учитывались ни отечественными, ни зарубежными специалистами.

Процесс прессования без бокового выдавливания возможен только в условиях, когда контактные поверхности рабочих органов пресс-гранулятора образуют замкнутый контур поперечного сечения слоя продукта. Это может быть обеспечено путем создания дополнительных торцевых контактных поверхностей, позволяющих реализовать в зонах отставания и выдавливания в фильеры матрицы схему плоского деформированного состояния прессуемого материала.

Эффективным конструктивным решением является предлагаемое нами устройство (патент РФ № 2412819) в виде двух колец, ограничивающих торцевые поверхности слоя прессуемого материала. Боковые поверхности сменных ограничительных колец, обращенные к торцам прессующих роликов и контактируемые с продуктом, а также рабочая поверхность матрицы образуют кольцевую полость с входящими внутрь нее прессующими роликами [7].

Важной задачей исследования многопараметрического нелинейного процесса прессового гранулирования в вальцово-матричном пресс-грануляторе является его адекватное математическое описание.

Математическая модель процесса прессования должна отражать энергетическое состояние системы «пресс-гранулятор – обрабатываемый материал», которое выступает в качестве ее внутренней характеристики. В пресс-грануляторах с торцевым ограничением клиновидного пространства

между рабочими органами механическая энергия передается прессуемому материалу через контактные поверхности матрицы, прессующих роликов и ограничительных колец. Мерой передаваемой энергии целесообразно считать напряженное состояние элементарного объема продукта на этих поверхностях, которое является основой для определения параметров эффекта, характеризующих процесс гранулирования. Таким образом, необходимо описать напряженное состояние прессуемого материала в клиновидном пространстве между рабочими органами пресс-гранулятора.

Прессуемый материал в клиновидном пространстве будем считать сплошной изотропной средой, обладающей свойствами упругопластического тела. Возможность распространения данной модели прессуемого материала на процесс гранулирования растительного сырья и преимущества ее применения обоснованы различными авторами [8], [9], [10]. При этом, рассматривая пластическую деформацию продукта, можно исходить как из теории малых упругопластических деформаций (деформационной теории пластичности), так и из теории пластического течения.

Так как обрабатываемый продукт является уплотняемым (сжимаемым) материалом, то дифференциальное уравнение неразрывности движения прессуемого материала в клиновидном пространстве имеет вид:

$$\frac{d \ln r(\mathbf{x}, t)}{dt} + \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

где

$r(\mathbf{x}, t)$ – плотность продукта в некоторой точке клиновидного пространства, заданной радиусом-вектором \mathbf{x} (напряженное состояние в данной точке известно), кг/м³;

t – время, с;

\mathbf{u} – поле скоростей движения частиц прессуемого материала.

Пластическое деформирование уплотняемых материалов всегда сопровождается объемной деформацией с изменением или без изменения геометрической формы [11]. Начало зоны отставания характеризуется наиболее интенсивным уплотнением продукта и преобладающей структурной деформацией. Однако здесь контактные напряжения, возникающие на поверхностях слоя материала, контактируемых с рабочими органами прессующего механизма, еще не оказывают заметного влияния на производительность пресса, мощность сил полезного сопротивления и другие параметры эффекта. При исследовании напряженного состояния прессуемого материала основной интерес представляет активная, с точки зрения влияния контактных напряжений на параметры эффекта, часть зоны отставания. В этой области клиновидного пространства материал все больше проявляет упругопластические свойства (этому способствует и предшествующая влаготепловая обработка сырья) и его плотность уже достаточно высока. Дальнейший рост плотности частично компенсируется увеличением расхода в зону выдавливания в фильеры матрицы, где значение плотности стабилизируется и его можно считать постоянным и равным плотности гранул в фильерах. В зоне опережения уплотнение отсутствует.

Уже при относительной плотности порядка 0,8 и сравнительно небольших значениях среднего давления (что справедливо для процесса прессового гранулирования) поведение уплотняемого материала мало отличается от поведения несжимаемых тел, что допускает использование методов теории пластичности несжимаемых тел [12].

Основываясь на вышесказанном, для описания напряженного состояния прессуемого материала примем допущение:

$$r(\mathbf{x}, t) = r' = \text{const}, \quad (2)$$

где r' – средняя плотность прессуемого материала в активной части клиновидного пространства, кг/м³.

В таком случае будет справедливо условие постоянства элементарного объема пластически деформируемого материала. С учетом (2) полная производная $d \ln r' / dt = 0$. Тензор градиента скорости обращается в нуль, и уравнение неразрывности (1) запишется следующим образом:

$$\operatorname{div} \dot{\mathbf{u}} = 0. \quad (3)$$

На элементарный объем dV прессуемого материала, перемещающийся в клиновидном пространстве с полем скоростей $\dot{\mathbf{u}}$, действует внешняя массовая сила $r' \mathbf{F} dV$, где \mathbf{F} – вектор единичной массовой силы. На каждый элемент dS поверхности, ограничивающей произвольный объем продукта V , м³, действует внешняя по отношению к этому объему сила $\mathbf{S}^n dS$, где \mathbf{S}^n – вектор поверхностных напряжений на площадке dS с внешней нормалью \mathbf{n} . Тогда уравнение изменения количества движения материала в клиновидном пространстве пресс-гранулятора будет иметь вид:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V r' \mathbf{u} dV = \iint_S \mathbf{S}^n dS + \iiint_V r' \mathbf{F} dV. \quad (4)$$

Учитывая, что $\frac{d}{dt} \iiint_V r' \mathbf{u} dV = \iiint_V r' \frac{d\dot{\mathbf{u}}}{dt} dV$ и $\iint_S \mathbf{S}^n dS = \iiint_V \operatorname{div} T_S dV$, из уравнения (4) получаем в общем виде дифференциальное уравнение движения продукта в клиновидном пространстве:

$$r' \frac{d\dot{\mathbf{u}}}{dt} = \operatorname{div} T_S + r' \mathbf{F}, \quad (5)$$

где T_S – тензор напряжений в прессуемом материале (составленный для схемы плоского деформированного состояния).

В пресс-грануляторе инерционным членом $r' \frac{d\dot{u}}{dt}$, а также массовой силой, представляющей собой величину третьего порядка малости, можно пренебречь по сравнению с компонентами тензора напряжений в обрабатываемом материале. Таким образом, уравнение (5) преобразуется в уравнение равновесия,

$$\operatorname{div} T_S = 0, \quad (6)$$

описывающее параметры напряженного состояния в прессуемом материале во всех точках замкнутого клиновидного пространства.

Для решения задачи по определению напряжений в прессуемом материале, находящемся в условиях плоского деформированного состояния, целесообразно применить инженерный метод [13], [14], [15]. Данный метод предполагает определение нормальных и касательных напряжений не в каждой точке объема деформируемого материала, а только на контактных поверхностях. Точное уравнение равновесия (6) может быть упрощено в предположении, что нормальные напряжения зависят только от одной из координат. Приближенное уравнение равновесия будет представлять собой одно дифференциальное уравнение в обыкновенных производных.

Введем в соответствии с рисунком 1 цилиндрическую систему координат (r, j, z) с полюсом в точке O_M , лежащей на оси вращения матрицы o_M . Ось $O_M z$ совпадает с осью вращения o_M . Полярная ось $O_M p$ выбирается на прямой, образованной пересечением плоскости радиального сечения слоя продукта с минимальной высотой h_d , м, и плоскости, перпендикулярной осям вращения рабочих органов. Цилиндрическая контактная поверхность матрицы с радиусом r_M , м, задается координатной поверхностью $r = r_M = \text{const}$.

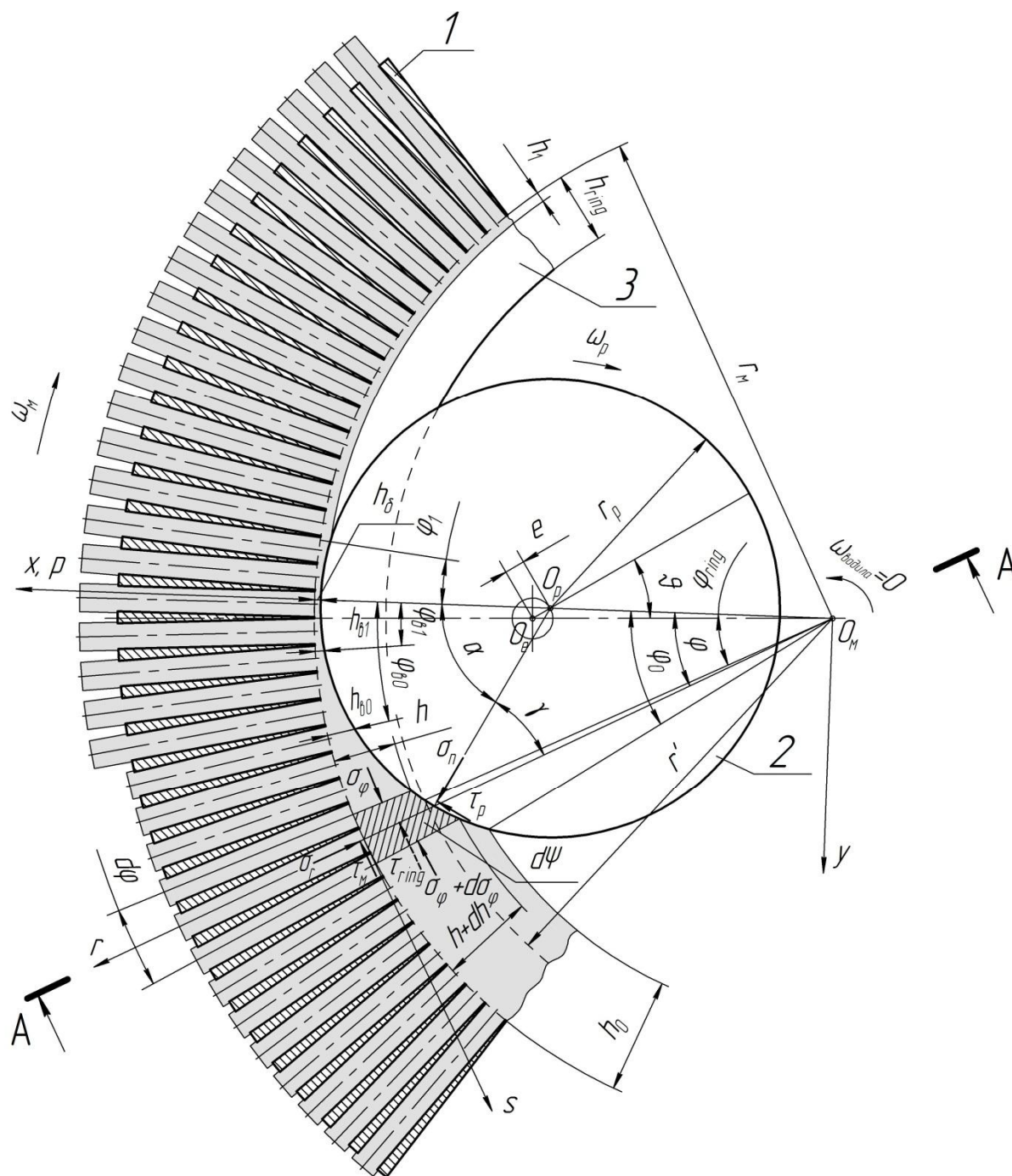


Рисунок 1 – Схема взаимодействия прессуемого материала с рабочими органами пресс-гранулятора в условиях торцевого ограничения клиновидного пространства:

1 – кольцевая матрица; 2 – прессующий ролик; 3 – ограничительное кольцо

Минимальная высота h_d слоя прессуемого материала обеспечивается поворотом эксцентриковой оси прессующего ролика на угол J , рад:

$$J = \arccos \frac{a_0^2 + e^2 - [r_m(1 - k_r) - h_d]^2}{2a_0 \cdot e}, \quad (7)$$

где

a_0 – межосевое расстояние $O_m O_e$, м;

e – эксцентриситет, м;

$k_r = r_p / r_m$ – относительный радиус прессующего ролика (r_p – радиус цилиндрической контактной поверхности обечайки прессующего ролика, м).

При этом угол J , отсчитываемый от линии $O_m O_e$ (соединяющей центры матрицы и эксцентриковой оси) в направлении, противоположном вращению матрицы, находится в пределах:

$$0 \leq J \leq \arccos \frac{a_0^2 + e^2 - r_m^2(1 - k_r)^2}{2a_0 \cdot e}.$$

Выделим в зоне отставания элементарный объем прессуемого материала, ограниченный цилиндрическими поверхностями матрицы 1 и прессующего ролика 2, контактными поверхностями ограничительных колец 3, а также двумя радиальными сечениями с элементарным углом dj между ними.

Границу, на которой прекращается контакт торцевых поверхностей ограничительных колец со слоем материала, зададим полярным уравнением:

$$r = r' = \sqrt{k_r^2 r_m^2 - [r_m(1 - k_r) - h_d]^2 \sin^2 j} + [r_m(1 - k_r) - h_d] \cos j + (h - h_{butt}), \quad (8)$$

где

j – угол поворота кольцевой матрицы, рад;

h – радиальная высота слоя прессуемого материала в клиновидном пространстве, м;

h_{butt} – радиальная высота проекции торцевой контактной поверхности слоя материала на плоскость, перпендикулярную осям вращения рабочих органов, м.

Параметр h_{butt} зависит от соотношения h_{ring}/h_0 , где h_{ring} – радиальная высота проекции торцевой контактной поверхности ограничительного кольца на плоскость, перпендикулярную осям вращения рабочих органов, м; h_0 – радиальная высота свободного от давления рабочих органов слоя материала, зависящая от подачи продукта в рабочую камеру пресса, м.

Если $h_{ring}/h_0 \geq 1$, то:

$$h_{butt} = h \text{ при } -j_1 \leq j \leq j_0, \quad (9)$$

где

j_0 – угловая координата радиального сечения, где начинается зона отставания и возникает контакт слоя материала с прессующим роликом, рад;

j_1 – угловая координата радиального сечения, где заканчивается зона опережения и прекращается контакт слоя материала с прессующим роликом, рад.

Если $h_{ring}/h_0 < 1$, то:

$$\begin{cases} h_{butt} = h \text{ при } -j_1 \leq j < j_{ring}, \\ h_{butt} = h_{ring} \text{ при } j_{ring} \leq j \leq j_0, \end{cases} \quad (10)$$

где j_{ring} – угол поворота матрицы, при котором образуется замкнутое клиновидное пространство, рад.

$$j_{ring} = \arccos \frac{(r_m - h_{ring})^2 - k_r^2 r_m^2 + [r_m(1 - k_r) - h_d]^2}{2(r_m - h_{ring}) \cdot [r_m(1 - k_r) - h_d]} . \quad (11)$$

Площадь $d\Psi$ проекции торцевой контактной поверхности элементарного объема материала на плоскость, перпендикулярную осям вращения рабочих органов, с учетом уравнения (8), записанного в краткой форме, выразится следующим образом:

$$d\Psi = \left(r_m h_{butt} - \frac{1}{2} h_{butt}^2 \right) dj . \quad (12)$$

Тогда площадь торцевой контактной поверхности элементарного объема материала можно получить, скорректировав $d\Psi$ умножением на коэффициент k_{ring} , учитывающий форму зазора Δ , м, между боковыми поверхностями ограничительных колец и торцами прессующих роликов.

В случае, когда торцевая контактная поверхность ограничительного кольца перпендикулярна контактной поверхности матрицы,

$$k_{ring} = 1 . \quad (13)$$

Когда торцевая контактная поверхность ограничительного кольца расположена под углом I , рад, к контактной поверхности матрицы, k_{ring} находится по формуле:

$$k_{ring} = \frac{1}{\sin I} . \quad (14)$$

Если торцевая контактная поверхность ограничительного кольца криволинейна и образована в диаметральном сечении выпуклой стороной обыкновенной циклоиды с начальной точкой, лежащей на окружности с радиусом $r_m - h_{ring}$, то k_{ring} находится по формуле:

$$k_{ring} = \frac{\frac{16R^2}{3} (\cos^3 c - 3\cos c + 2) - 8R(r_m - h_{ring}) \cos c + 8R(r_m - h_{ring})}{2r_m h_{ring} - h_{ring}^2} , \quad (15)$$

где

R – радиус производящего круга циклоиды, м;

$$c = \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{h_{ring}}{R} \right).$$

Регулированием величины зазора Δ и оптимизацией его формы обеспечивается возможность изменения сопротивления выдавливанию материала через этот зазор.

Через точку с угловой координатой j , принадлежащую контактной поверхности матрицы и биссектрисе угла dj , проведем ось r в радиальном направлении (по нормали к данной поверхности) и ось s в окружном направлении (по касательной к направляющей данной поверхности). Приложим к элементарному объему реакции связей и спроектируем элементарные силы на оси r и s (см. рисунок 1).

Примем, что на выделенный объем со стороны слоя материала, примыкающего к радиальному сечению с высотой h , действует нормальное тангенциальное напряжение S_j , Па. Тогда в радиальном сечении с высотой слоя $h + dh$ будет действовать напряжение

$$S_j + \frac{\partial S_j}{\partial j} dj = S_j + dS_j.$$

Вторая часть последнего равенства получена с учетом предположения, что S_j не зависит от координаты r и является средним по высоте сечения, то есть для контактной поверхности справедливо условие

$$\frac{\partial S_j}{\partial j} = \frac{dS_j}{dj}.$$

Исключив из двух полученных уравнений равновесия нормальное напряжение S_n , Па, пренебрегая бесконечно малыми второго порядка

$$\text{малости, считая } \sin \frac{dj}{2} \approx \frac{dj}{2}, \cos \frac{dj}{2} \approx 1 \text{ и } dj = \frac{dh}{\operatorname{tg}(r_M - h)} \text{ (с точностью до}$$

малых высшего порядка), с учетом выражения (12) и дальнейших преобразований, получим дифференциальное уравнение в виде:

$$ds_j + \left(\frac{r_M}{r_M - h} \right) (s_j - s_r) \frac{dh}{h} + \left[k_b \left(1 + \frac{2\Delta}{b} \right) \left(\frac{r_M}{r_M - h} \right) t_M + (\operatorname{tg}^2 g + 1) t_p + \right. \\ \left. + \frac{2k_{ring}}{b(r_M - h)} \left(r_M h_{butt} - \frac{1}{2} h_{butt}^2 \right) t_{ring} \right] \frac{dh}{htg g} = 0, \quad (16)$$

где

s_r – нормальное радиальное напряжение в продукте, Па;

t_M , t_p , t_{ring} – касательные тангенциальные напряжения соответственно на контактных поверхностях матрицы, прессующих роликов и ограничительных колец, Па;

g – угол, образованный касательными к контактными поверхностям матрицы и ролика в точках, лежащих в одной плоскости радиального сечения слоя продукта и одной плоскости, перпендикулярной осям вращения рабочих органов, рад, и связанный с координатой j зависимостью:

$$g = \arcsin \left[\frac{r_M (1 - k_r) - h_d}{k_r r_M} \sin j \right];$$

b – рабочая ширина кольцевой матрицы, м;

k_b – коэффициент, определяемый конфигурацией ограничительных колец: контактная поверхность вертикальная – $k_b = 1$, наклонная –

$$k_b = 1 + \frac{2h_{ring}}{\operatorname{tg} l (b + 2\Delta)}, \text{ циклоидальная } - k_b = 1 + \frac{2R(2c - \sin 2c)}{b + 2\Delta}.$$

Для зоны опережения дифференциальное уравнение будет отличаться от уравнения (16) знаками контактных касательных напряжений.

При установившемся рабочем процессе пресс-гранулятора в зонах отставания и опережения слой материала контактирует с продуктом,

запрессованным в фильеры матрицы и удерживаемым неровностями прессующих роликов. Поэтому, в соответствии с законом минимального расхода энергии, затраты энергии на внутренние сдвиги в прессуемом материале на контактной поверхности меньше, чем на внешнее скольжение. Касательные напряжения t_m и t_p будут соответствовать пределу текучести при сдвиге t_s , Па, прессуемого материала. Более высокого значения касательные напряжения достигнуть не могут, так как в противном случае начнется заедание и разрушение контактной поверхности. Касательное напряжение на шероховатых контактных поверхностях ограничительных колец t_{ring} также примем равным величине t_s , что отвечает наиболее математически строгому решению задачи и позволит осуществлять расчет пресс-гранулятора по максимально возможным значениям нормальных напряжений [13], [14].

Поскольку $t_m = t_p = t_{ring} = f' t_s$, где фактор трения f' равен единице, то для плоского деформированного состояния цилиндрическое условие пластичности, которое является точным при $t \rightarrow t_s$, запишется в выбранной системе координат следующим образом [13], [15]:

$$s_j - s_r = 0. \quad (17)$$

Тогда уравнение (16) можно преобразовать к виду:

$$ds_j + \operatorname{sgn} t \cdot \left[k_b \left(1 + \frac{2\Delta}{b} \right) \left(\frac{r_m}{r_m - h} \right) + (\operatorname{tg}^2 g + 1) + \right. \\ \left. + \frac{2k_{ring}}{b(r_m - h)} \left(r_m h_{butt} - \frac{1}{2} h_{butt}^2 \right) \right] \frac{f' t_s dh}{htg g} = 0, \quad (18)$$

где $\operatorname{sgn} t = 1$ – для зоны отставания; $\operatorname{sgn} t = 0$ – в нейтральном сечении зоны выдавливания в фильеры (где касательные тангенциальные напряжения равны нулю); $\operatorname{sgn} t = -1$ – для зоны опережения.

Ранними исследователями [9], [10] установлено, что предел текучести при сдвиге t_s при гранулировании растительного материала представляет собой функцию от напряжения всестороннего сжатия (гидростатического напряжения) s_c , Па:

$$t_s = \frac{s_{s0}}{\sqrt{3}} \exp bs_c, \quad (19)$$

где

s_{s0} – предел текучести сжатия продукта при атмосферном давлении, Па;

b – коэффициент всестороннего давления, Па⁻¹.

Параметры s_{s0} и b зависят от состава продукта, температуры, влажности и определяются экспериментально.

В условиях плоского деформированного состояния, обеспечиваемого ограничительными кольцами, перемещения w , м, продукта вдоль оси $O_M z$ равны нулю. В замкнутом клиновидном пространстве происходит стеснение поперечной деформации элементов, каждый из которых в соответствии с рисунком 2 может быть выделен в слое прессуемого материала двумя сечениями, перпендикулярными оси $O_M z$ и находящимися одно от другого на расстоянии dz . В каждом из этих сечений вследствие стеснения перемещений w возникают нормальные осевые напряжения s_z , Па. Исходя из уравнений связи напряжений и пластических деформаций при относительной осевой деформации $e_z = \partial w / \partial z = 0$, напряжение s_z определим по формуле:

$$s_z = \frac{s_j + s_r}{2}. \quad (20)$$

Напряжение s_z обуславливает силу, действующую на прессуемый материал со стороны контактных поверхностей ограничительных колец и уравновешивающую боковые перемещения масс.

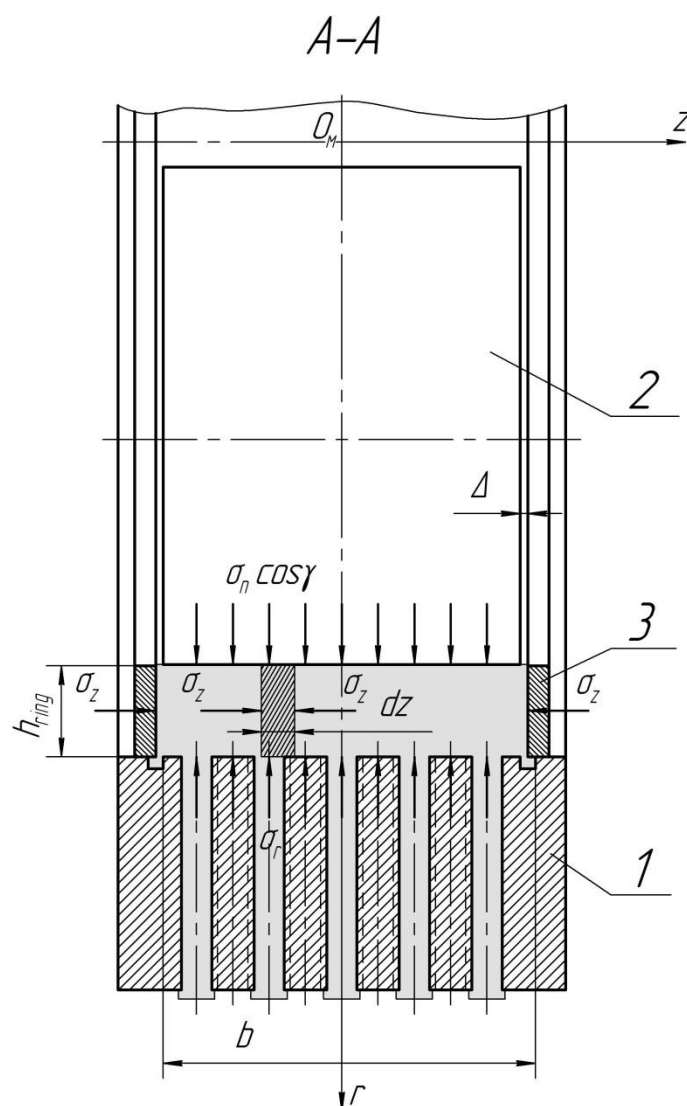


Рисунок 2 – Поперечное сечение слоя прессуемого материала в замкнутом клиновидном пространстве пресс-гранулятора ($k_{ring} = 1, k_b = 1$):

1 – кольцевая матрица; 2 – прессующий ролик; 3 – ограничительное кольцо

Из выражений (17) и (20) имеем:

$$s_z = s_j = s_r = s_c. \quad (21)$$

Таким образом, можно считать, что прессование продукта при торцевом ограничении клиновидного пространства и выполнении условия (17) аналогично случаю, когда на девиатор напряжений наложен шаровой

тензор в виде всестороннего равномерного сжатия, увеличивающего пластичность прессуемого материала.

При этом необходимо учитывать, что напряжения S_j , S_r и S_z являются средними по ширине рабочих органов пресс-гранулятора.

Решение уравнения (18) относительно выбранной переменной позволяет найти распределение контактных напряжений на всей протяженности клиновидного пространства с учетом того, что касательные тангенциальные напряжения в зоне выдавливания изменяются по линейному закону, а также получить координаты границ зоны выдавливания в фильеры матрицы. Это необходимо для дальнейшего определения радиальной нагрузки на рабочие органы пресс-гранулятора, сил, действующих на ограничительные кольца, момента сил полезного сопротивления, производительности пресс-гранулятора.

Производительность Q , кг/с, пресс-гранулятора целесообразно определить следующим выражением:

$$Q = r_b q Q_\phi, \quad (22)$$

где

r_b – плотность продукта в зоне выдавливания в фильеры матрицы, кг/м³;

q – число прессующих роликов;

Q_ϕ – расход материала через фильеры матрицы, м³/с.

В условиях незамкнутого клиновидного пространства между рабочими органами пресс-гранулятора расход Q_ϕ может быть представлен в виде:

$$Q_\phi = Q_0 - Q_{b1} - 2(Q'_{бок} + Q''_{бок}), \quad (23)$$

где

Q_0 – расход материала через радиальное сечение (высотой h_0) клиновидного пространства, соответствующее началу зоны отставания, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_{B1} – расход материала через радиальное сечение (высотой h_{B1}) клиновидного пространства, определяющее границу между зоной выдавливания в фильеры матрицы и зоной опережения, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q'_{бок}$ – расход материала через сечение зоны выдавливания в фильеры матрицы плоскостью, совпадающей со свободной торцевой поверхностью слоя, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q''_{бок}$ – расход материала через сечение зоны отставания плоскостью, совпадающей со свободной торцевой поверхностью слоя, $\text{м}^3/\text{с}$.

Из выражения (23) следует, что общая производительность пресс-гранулятора, определяемая расходом Q_ϕ , может быть увеличена, во-первых, за счет предотвращения бокового выдавливания материала и, во-вторых, за счет увеличения разности расходов Q_0 и Q_{B1} .

В пресс-грануляторе с торцевым ограничением клиновидного пространства расход Q_ϕ в формуле (23) корректируется на величину уменьшения бокового выдавливания прессуемого материала. При этом предполагается, что высота торцевых контактных поверхностей ограничительных колец выбрана оптимальной, исходя из ее влияния на энергоемкость процесса и нагрузки на рабочие органы прессующего механизма. Если ограничительные кольца полностью компенсируют поперечную деформацию продукта, то общая производительность пресс-гранулятора возрастает на величину $2(Q'_{бок} + Q''_{бок})$:

$$Q_\phi = Q_0 - Q_{B1}. \quad (24)$$

Для замкнутого клиновидного пространства на основании уравнения (3) можно считать, что:

$$Q_0 = Q_{B0}, \quad (25)$$

где Q_{B0} – расход материала через радиальное сечение (высотой h_{B0}) клиновидного пространства, соответствующее началу зоны выдавливания в фильеры матрицы, м³/с.

Из вышеизложенного очевидно, что условие (25) несправедливо для существующих конструкций пресс-грануляторов, не имеющих ограничительных колец.

Объемные расходы Q_{B0} и Q_{B1} при пластическом течении материала в клиновидном пространстве можно определить интегрированием элементарных потоков. Тогда без учета величины зазоров Δ и конфигурации ограничительных колец имеем:

$$Q_{\Phi} = Q_{B0} - Q_{B1} = b \left(\int_{r_M - h_{B0}}^{r_M} u_j dr - \int_{r_M - h_{B1}}^{r_M} u_j dr \right), \quad (26)$$

где u_j – скорость элементарного слоя материала в граничных сечениях зоны выдавливания в фильеры матрицы, м/с.

Считаем, что окружные скорости u_M и u_p , м/с, точек контактных поверхностей матрицы и прессующего ролика равны между собой:

$$u_M = \left(1 - \frac{h_d}{r_M} \right) u_p \approx u_p. \quad (27)$$

Тогда проекция скорости u_p на ось s в начале зоны выдавливания в фильеры матрицы меньше скорости u_M . Исходя из этих соображений и представив элементарные слои в виде концентрических окружностей с центром в точке O_M , скорость u_j определим зависимостью:

$$u_j = w_M r, \quad (28)$$

где

w_M – угловая скорость кольцевой матрицы относительно водила прессующих роликов, рад/с;

r – координата, определяющая положение элементарного слоя прессуемого материала, м.

Преобразовав выражение (26) с учетом (28) и подставив его в формулу (22), получим:

$$Q = r_{в1} q b w_M (h_{в0} - h_{в1}) (r_M - \bar{h}_B), \quad (29)$$

где \bar{h}_B – средняя высота зоны выдавливания в фильеры матрицы, м.

$$\bar{h}_B = \frac{h_{в0} + h_{в1}}{2}. \quad (30)$$

Переменные $h_{в0}$ и $h_{в1}$ (см. рисунок 1) можно выразить через угловые координаты верхней $j_{в0}$, рад, и нижней $j_{в1}$, рад, границ зоны выдавливания:

$$\begin{cases} h_{в0} = r_M - \sqrt{k_r^2 r_M^2 - [r_M(1 - k_r) - h_d]^2 \sin^2 j_{в0} - [r_M(1 - k_r) - h_d] \cos j_{в0}}, \\ h_{в1} = r_M - \sqrt{k_r^2 r_M^2 - [r_M(1 - k_r) - h_d]^2 \sin^2 j_{в1} - [r_M(1 - k_r) - h_d] \cos j_{в1}}. \end{cases} \quad (31)$$

Известная из [9] зависимость для производительности пресс-грануляторов практически совпадает с полученной формулой (29), то есть справедлива для исследуемого случая торцевого ограничения клиновидного пространства. Другими словами, эта зависимость показывает завышенную действительную производительность прессующих механизмов без ограничительных колец и ее необходимо корректировать на величину бокового выдавливания.

Из выражений (29) и (31) следует, что производительность пресс-гранулятора зависит от границ зоны выдавливания в фильеры матрицы. Определим границы зоны выдавливания в условиях торцевого ограничения клиновидного пространства.

Перепишем уравнение (18) относительно переменной j :

$$dS_j + \operatorname{sgnt} \cdot \left[k_b \left(1 + \frac{2\Delta}{b} \right) \frac{r_M}{h} + (\operatorname{tg}^2 g + 1) \left(\frac{r_M - h}{h} \right) + \frac{2k_{ring}}{bh} \left(r_M h_{butt} - \frac{1}{2} h_{butt}^2 \right) \right] f' t_s dj = 0. \quad (32)$$

В уравнении (32) сумму, заключенную в квадратные скобки, обозначим как функцию K конструктивных параметров рабочих органов пресс-гранулятора. Тогда с учетом (19) и (21), разделив переменные, получим:

$$\frac{dS_j}{\exp bS_j} = -\operatorname{sgnt} \cdot f' \frac{S_{s0}}{\sqrt{3}} K dj. \quad (33)$$

Решение уравнения (33) для зоны отставания ($j_{в0} \leq j \leq j_0$) и для упругопластической части зоны опережения ($0 \leq j \leq j_{в1}$) (нормальным радиальным напряжением в сечении с высотой слоя h_d пренебрегаем) может быть записано в виде функции с промежуточным переменным параметром – определенным интегралом с переменным верхним пределом. При этом должны быть учтены условия (9), (10). Решение для зоны отставания имеет вид:

$$S_j = S_r = S_z = -\frac{1}{b} \ln \left(1 + f' \frac{bS_{s0}}{\sqrt{3}} \int_{j_0}^j K dj \right). \quad (34)$$

Решение для зоны опережения:

$$S_j = S_r = S_z = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - f' \frac{bS_{s0}}{\sqrt{3}} \int_0^j K dj \right). \quad (35)$$

Для нахождения $j_{в0}$ и $j_{в1}$ (численными методами) в выражения (34), (35) необходимо подставить граничные значения пределов интегрирования:

$$S_{rв0} = -\frac{1}{b} \ln \left(1 + f' \frac{bS_{s0}}{\sqrt{3}} \int_{j_0}^{j_{в0}} K dj \right), \quad (36)$$

$$S_{rB1} = -\frac{1}{b} \ln \left(1 - f' \frac{b S_{s0}}{\sqrt{3}} \int_0^{j_{B1}} K dj \right). \quad (37)$$

Нормальные радиальные напряжения S_{rB0} и S_{rB1} на границах зоны выдавливания принимаются равными нормальному осевому напряжению на входе в фильеру – сопротивлению фильеры, которое определяется конструктивными параметрами фильер и структурно-механическими свойствами продукта.

Анализ уравнений (36), (37) и других зависимостей, полученных на основе уравнения (32), показывает, что за счет введения дополнительных контактных поверхностей ограничительных колец (функция K) при том же сопротивлении фильер обеспечивается смещение зоны отставания в направлении, противоположном вращению рабочих органов, с одновременным расширением границ зоны выдавливания. Это означает, что увеличивается разность h_{B0} и h_{B1} в формуле (29) и, соответственно, разность расходов Q_0 и Q_{B1} в правой части выражения (24). Следовательно, увеличивается производительность пресс-гранулятора.

На основании изложенного можно сделать вывод, что боковое выдавливание материала является важным недостатком в рабочем процессе всех существующих пресс-грануляторов с кольцевой матрицей и его необходимо учитывать с целью повышения производительности и снижения энергоемкости вновь проектируемых прессующих механизмов. Теоретически боковое выдавливание характеризуется различной интенсивностью в зависимости от напряженного состояния, вида и реологических свойств обрабатываемого материала, конструктивных параметров пресса. В то же время при гранулировании растительного сырья (различных рецептов комбикормов, подсолнечного жмыха и шрота) в ходе экспериментальных исследований значительное боковое выдавливание наблюдалось нами как на лабораторном пресс-грануляторе

ПГМ-05, так и на промышленной установке Б6-ДГВ. Таким образом, устройство в виде элементов рабочих органов – сменных ограничительных колец, предотвращающих поперечную деформацию продукта и улучшающих условия его поступления в зону отставания, – является эффективным конструктивным решением, учитывающим особенности прессования в замкнутом клиновидном пространстве.

Сформированная в результате теоретических исследований математическая модель процесса прессового гранулирования в условиях торцевого ограничения клиновидного пространства отражает энергетическое состояние системы «пресс-гранулятор – обрабатываемый материал», внутренняя характеристика которой, как видно из формулы (16), связывает структурно-механические параметры продукта и конструктивные параметры пресс-гранулятора, включая параметры дополнительных контактных поверхностей, и лежит в основе параметров эффекта, характеризующих процесс гранулирования. Математическая модель позволяет рассматривать производительность, затраты энергии, нагрузки на рабочие органы и другие параметры процесса, исходя из их взаимосвязи друг с другом.

Анализ математической модели показывает, что введение дополнительных контактных поверхностей в виде ограничительных колец с оптимальными конструктивными параметрами обеспечивает существенное повышение производительности и снижение энергоемкости пресс-гранулятора за счет предотвращения бокового выдавливания продукта и вследствие изменения границ зон клиновидного пространства. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Таким образом, направление совершенствования рабочего процесса вальцово-матричных пресс-грануляторов с кольцевой матрицей путем торцевого ограничения клиновидного пространства дополнительными

контактными поверхностями является актуальным, обоснованным и отвечает критериям ресурсосбережения и энергоэффективности.

Литература

1. Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия) / Л.А. Глебов [и др.]. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 816 с.
2. Handbook of powder technology Vol. 11 Granulation / edited by A.D. Salman, M.J. Hounslow, J.P.K. Seville. – Oxford: Elsevier, 2007. – 1402 p.
3. Жислин, Я.М. Дробильное и прессующее оборудование комбикормового завода / Я.М. Жислин, Б.И. Пикус. – М.: Агропромиздат, 1987. – 118 с.
4. Шестерина, С.А. Гранулирование комбикормов за рубежом / С.А. Шестерина. – М.: ЦНИИТЭИ Министерства хлебопродуктов СССР, 1989. – 28 с.
5. Pelletizing [Электронный ресурс] // Desmet Ballestra Stolz. – Режим доступа: http://www.desmetballestrastolz.com/PDF/gb_pelletizing.pdf. Проверено: 18.11.2011.
6. The Pelleting Process [Электронный ресурс] // California Pellet Mill Co. – Режим доступа: http://www.cpm.net/images/download_files/file1251467542.pdf. Проверено: 18.11.2011.
7. Пат. 2412819 Российская Федерация, МПК⁸ В 30 В 11/20, В 28 В 3/18. Пресс-гранулятор / Ковриков И.Т., Кириленко А.С.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет». – № 2009145789/02; заявл. 09.12.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6. – 10 с.: ил.
8. Винников, Г.А. Исследование процесса гранулирования комбикорма в пресах с вращающейся кольцевой матрицей: дис. ... канд. техн. наук / Г.А. Винников. – М., 1970. – 164 с.
9. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна / под ред. А.Я. Соколова. – М.: Колос, 1984. – 445 с.
10. Полищук, В.Ю. Исследование процесса гранулирования комбикормов и путей повышения долговечности рабочих органов прессов-грануляторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.14 / В.Ю. Полищук. – М., 1979. – 192 с.
11. Богинский Л.С. Теория и практика сухого изостатического (радиального) прессования порошковых и волоконных уплотняемых материалов: монография / Л.С. Богинский, Е.Е. Петюшик, О.П. Реут [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://science.by/upload/iblock/ba6/ba626ce326f6b018fa9c90da8b44c010.pdf>. Проверено: 18.11.2011.
12. Друянов, Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел / Б.А. Друянов. – М.: Машиностроение, 1989. – 168 с.
13. Унксов, Е. П. Инженерная теория пластичности: методы расчета усилий деформирования / Е. П. Унксов. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.
14. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
15. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов; под ред. Е.П. Унксова. – М.: Высш. шк., 1963. – 390 с.