

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 631.363

С.В. Денисов,
В.В. Новиков,
А.А. Курочкин,
Г.В. Шабурова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗОНЫ ЗАГРУЗКИ ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРА

Ключевые слова: пресс-экструдер, зона загрузки, шнек, цилиндр, винтовой канал, сырье, коэффициент трения, пропускная способность, производительность, конструктивные параметры.

Шнековая часть пресс-экструдеров состоит из нескольких ступеней, каждая из которых имеет свое назначение. В зависимости от этого назначения каждая часть шнека имеет ту или иную функцию.

Например, в экструдерах типа КМЗ первая из трех ступеней является зоной загрузки, в которой продолжают интенсивное перемешивание (после дозирующего механизма) и перемещение частиц обрабатываемого сырья вдоль оси шнека, а также начинается их уплотнение. Определение пропускной способности данной зоны имеет как теоретическое, так и практическое значение в общем анализе работы всего пресс-экструдера.

Если предположить, что на протяжении всей зоны загрузки шнек работает как транспортер, обрабатываемое сырье имеет хорошую сыпучесть и высокую плотность, то с некоторым допущением можно считать траектории перемещения отдельных частиц параллельными оси шнека, и определение их скорости не представляет относительно сложной задачи.

В реальных условиях многие обрабатываемые материалы имеют плохую сыпучесть и небольшую плотность, а при попадании частиц сырья непосредственно в цилиндр пресс-экструдера механизм их перемещения меняется. Происходит уплотнение частиц, которые в дальнейшем склонны перемещаться как сплошная неразрывная среда. Движение сырья происходит в результате действия сил трения, которые воздействуют на его частицы со стороны шнека и цилиндра пресс-экструдера.

Проведем теоретический анализ пропускной способности зоны загрузки пресс-экструдера, предварительно приняв некоторые допущения [1].

Основное из них заключается в том, что частицы, уплотняясь, образуют «вязкопластичную» массу, в которой отсутствуют деформации сдвига. На массу действуют силы трения, которые возникают между ее поверхностью и поверхностями шнека и цилиндра. Считаем, что цилиндр неподвижен, а шнек движется, как показано на рисунке 1.

Начальное положение винтового канала показано в положении 1, точка А расположена на массе. Канал шнека движется со скоростью V . За время t он проходит расстояние $A-B$ и оказывается в положении 2, при этом точка А перемещается в точку A' . Следовательно, масса проходит вдоль канала расстояние $B-A'$.

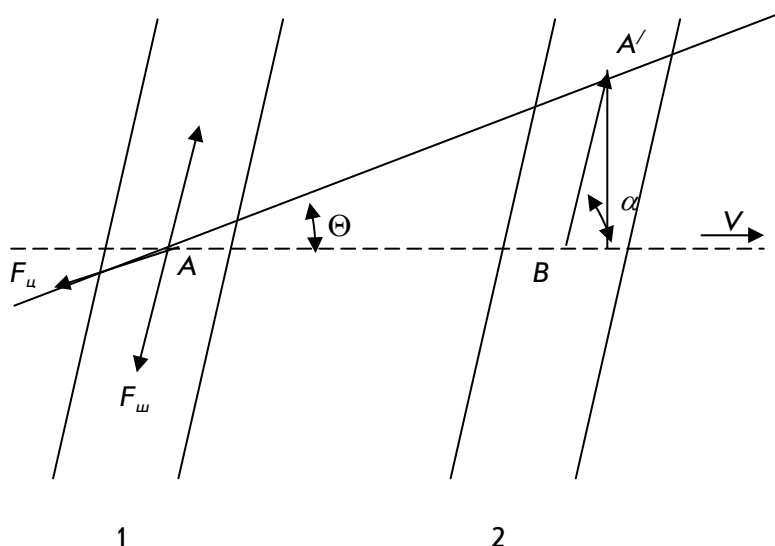


Рис. Схема движения материала в винтовом канале шнека в зоне загрузки

Точка A перемещается относительно цилиндра по линии $A-A'$ и относительно шнека по линии $B-A'$. Угол θ показывает отклонение линии $A-A'$ от горизонтали. За положительное направление угла принимаем движение по часовой стрелке.

Скорость v , с которой масса движется по каналу шнека можно определить из выражения:

$$v = \frac{(B - A')}{t} = V \frac{(B - A')}{(A - B)}. \quad (1)$$

Так как линия $B-A'$ отклонена от горизонтали на угол α , то запишем уравнение (1) в следующем виде

$$v = V \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta + \alpha)}, \quad (2)$$

где α – угол подъема винтовой линии шнека.

Используя обычные тригонометрические преобразования, получим

$$v = \frac{V}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} \theta}. \quad (3)$$

Рассмотрим силы трения, действующие на массу. При установившемся движении эти силы должны быть равны:

$$F_w = F_u \cos(\theta + \alpha), \quad (4)$$

где F_w – сила трения, действующая на массу со стороны поверхности шнека;

F_u – сила трения, действующая на массу со стороны цилиндра.

Так как углы α и θ должны быть всегда положительными, то силы трения, действующие на массу со стороны цилиндра, всегда должны быть больше, чем силы трения, действующие со стороны

поверхности шнека. Обозначим отношение этих сил через R и запишем:

$$\cos(\theta + \alpha) = R. \quad (5)$$

Если известно значение R , то величину угла θ можно определить из уравнения (5), а скорость транспортирования материала определяется из уравнения (3).

Еще раз отметим, что приведенные уравнения справедливы для случая, когда частицы обрабатываемого сырья движутся как сплошная неразрывная среда.

Дальнейший анализ пропускной способности зоны загрузки требует введения некоторых допущений в части природы сил трения F_w и F_u .

Предварительно оценим поведение массы сырья в некоторых предельных случаях.

Во-первых, отметим, что при $R \geq 1$ масса не перемещается, так как в этом случае угол θ равен нулю, а из уравнения (3) следует, что скорость v , с которой масса движется по каналу шнека, стремится к нулю. Таким образом, движение массы сырья вдоль винтового канала отсутствует; она находится в канале шнека и вращается вместе с ним. При таких условиях процесс экструзии прекращается.

Второй предельный случай имеет место при «проскальзывании шнека», т.е. тогда, когда действующие со стороны шнека силы трения не оказывают никакого воздействия на массу. Если в винтовом канале отсутствует градиент давления, то F_w становится равным нулю, и, следовательно, $R = 0$. Из этого следует, что

$(\Theta + \alpha) = 1,57 \text{ рад}(90^\circ)$. Тогда уравнение (3) можно переписать в виде

$$v = \frac{V}{\cos\alpha + \sin\alpha \cdot \text{ctg}(1,57 - \alpha)} = V \cos\alpha = V_z = 2\bar{v}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что скорость массы равна составляющей скорости цилиндра, направленной вдоль оси винтового канала.

Третий предельный случай учитывает тот факт, что для ограничения продвижения массы вдоль оси на поверхности цилиндра пресс-экструдера нарезаны продольные пазы. Для этого случая характерно, что угол $\Theta = 1,57 \text{ рад}(90^\circ)$, а уравнение (3) для этого случая имеет вид

$$v = \frac{V}{\cos\alpha}. \quad (7)$$

Уравнение (7) можно представить и в другой форме

$$v = 2\bar{v} / \cos^2 \alpha, \quad (8)$$

где \bar{v} – средняя скорость перемещаемой массы.

Рассмотрим более подробно случай, при котором движение массы в винтовом канале прекратится. Из уравнения (3) следует, что этот случай имеет место при условии, что угол Θ равен нулю. Обозначим отношение сил трения, при которых перемещение массы сырья отсутствует, через R^* . Из уравнения (5) следует, что R^* является функцией угла α (угла подъема винтовой линии шнека). Известно, что для перемещения массы при больших углах подъема винтовой линии требуется более благоприятное соотношение сил трения, чем для малых углов. Например, если угол подъема винтовой линии близок к 90° , то устойчивый процесс можно осуществить только с таким шнеком, коэффициент трения которого по отношению к массе равен нулю. С другой стороны, по мере уменьшения угла α становятся приемлемыми все менее благоприятные соотношения сил трения.

В предельном случае, когда угол подъема винтовой линии уменьшится до нуля, значение R^* станет равным единице.

Есть все основания предполагать, что во время работы пресс-экструдера соотношение сил трения существенно зависит от условий процесса и меняется в определенных пределах. Следовательно, изменение частоты вращения шнека, температуры цилиндра, давления в головке и ряда других факторов приведет, по всей вероятности, к изменению соотношения

между силами трения. При этом приостановка или даже полное прекращение перемещения сырья для шнека с большими углами подъема винтовой линии более вероятно, чем для шнеков с малыми углами подъема винтовой линии.

Для выяснения рациональных угла подъема винтовой линии шнека и скорости перемещения обрабатываемого сырья в зоне загрузки пресс-экструдера проанализируем силы, действующие на его массу.

Предположим, что масса обрабатываемого сырья оказывает на соприкасающиеся с ней поверхности «гидростатическое» (одинаковое во всех направлениях) давление, а градиент давления вдоль винтового канала отсутствует. Для таких условий силы трения, действующие на массу, можно определить, умножая площадь ее поверхности на коэффициент трения. Отношение сил трения R в этом случае будет равно

$$R = \frac{F_{ш}}{F_{ц}} = \frac{S_{ш} f_{ш}}{S_{ц} f_{ц}}, \quad (9)$$

где $S_{ш}$ – общая площадь поверхности шнека, соприкасающаяся с массой, м^2 ;

$S_{ц}$ – площадь цилиндра, соприкасающаяся с массой, м^2 ;

$f_{ш}$ – коэффициент трения сырья о поверхность шнека;

$f_{ц}$ – коэффициент трения сырья о поверхность цилиндра.

Площадь цилиндра, соприкасающуюся с массой, можно определить из уравнения:

$$S_{ц} = \pi D L, \quad (10)$$

где D – диаметр шнека;

L – длина оси шнека.

Если пренебречь шириной витка шнека, то его площадь равна

$$S_{ш} = \pi(D - 2h)L + 2 \int_{r_0}^r z dz. \quad (11)$$

Известно, что длина пути по оси z является функцией радиального положения (координаты r) и связана с длиной оси шнека L уравнением:

$$z = \frac{L}{\sin \zeta}, \quad (12)$$

где ζ – угол подъема винтовой линии, зависящий от положения координаты r .

При совместном решении трех последних уравнений получим

$$\frac{S_{ш} f_{ш}}{S_{ц} f_{ц}} = 1 - 2 \frac{h}{D} + \frac{2}{\pi D} \int_{r_0}^r \frac{dz}{\sin \alpha}. \quad (13)$$

Ширина винтового канала, перпендикулярная оси z , определится из уравнения

$$b = \pi D \sin \alpha. \quad (14)$$

Так как b не зависит от r , то получим следующее соотношение:

$$D = D_0 \sin \zeta_0 = 2r \sin \zeta_z, \quad (15)$$

где ζ_0 – угол подъема винтовой линии по внутреннему диаметру нарезки;

D_0 – внутренний диаметр нарезки шнека.

Следовательно,

$$\frac{S_u f_u}{S_y f_y} = 1 - 2 \frac{h}{D} + \frac{4}{\pi D^2 \sin \alpha} \int_{r_0}^r r dr. \quad (16)$$

После интегрирования получим

$$\frac{S_u f_u}{S_y f_y} = 1 - 2 \frac{h}{D} + \frac{2(r - r_0)(r + r_0)}{\pi D^2 \sin \alpha}; \quad (17)$$

$$\frac{S_u f_u}{S_y f_y} = 1 - 2 \frac{h}{D} \left[1 - \frac{1 - (h/D)}{\pi \sin \alpha} \right]. \quad (18)$$

Из выражения (18) найдем угол наклона винтовой линии шнека:

$$\sin \alpha = \frac{-h/D}{\pi \left\langle \frac{S_u f_u}{S_y f_y} - 1 + 2 \frac{h}{D} \right\rangle}; \quad (19)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{-h/D}{\pi \left\langle \frac{S_u f_u}{S_y f_y} - 1 + 2 \frac{h}{D} \right\rangle}. \quad (20)$$

Зависимость, выражаемая формулой (20), позволяет определить угол наклона винтовой линии шнека в зависимости от конструктивных параметров шнека и свойств обрабатываемого сырья.

Многие исследователи считают, что при анализе работы шнека за обобщенный показатель, характеризующий его конструктивные параметры и свойства обрабатываемого сырья, следует принимать соотношение коэффициентов трения сырья о поверхность шнека и поверхность цилиндра.

Исходя из ранее принятых допущений, определим пропускную способность зоны загрузки пресс-экструдера.

Производительность шнека в зоне загрузки получим, умножив скорость движения материала вдоль оси шнека на площадь живого сечения материала вдоль оси шнека, плотность смеси, коэффициент осевой скорости материала и коэффициент заполнения межвиткового объема шнека:

$$Q = g \frac{Sh}{\sin \alpha} \rho \cdot \psi \cdot \kappa_v, \quad (21)$$

где ψ – коэффициент заполнения межвиткового объема шнека;

κ_v – коэффициент осевой скорости материала.

Учитывая, что

$$S = \pi D \sin \alpha, \quad (22)$$

коэффициент осевой скорости материала определяется [2]:

$$\kappa_v = \frac{\cos \alpha \cos(\varphi + \alpha)}{\cos \varphi}, \quad (23)$$

где φ – угол трения, $\varphi = \arctg f$.

Скорость движения материала вдоль оси шнека [3]:

$$g = \frac{(D - h) \omega \sin \alpha}{4}. \quad (24)$$

Получим

$$Q = \frac{(D - h)}{4} \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot \rho \cdot \psi \cdot \frac{\cos \alpha \cos(\alpha + \varphi)}{\cos \varphi}. \quad (25)$$

Полученные аналитические выражения позволили установить зависимость угла наклона винтовой линии шнека и пропускной способности зоны загрузки пресс-экструдера от конструктивных параметров шнека и коэффициентов трения f_u и f_y . При этом следует иметь в виду, что значения этих коэффициентов зависят не только от механических свойств поверхностей шнека и цилиндра пресс-экструдера, но и от их температуры.

Библиографический список

- Новиков В.В. Математическое обоснование выходной зоны пресс-экструдера / В.В. Новиков, С.В. Денисов, Я.М. Бекетов // Актуальные инженерные проблемы АПК в XXI веке: сб. науч. тр. инженерной секции Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию СГСХА. – Самара, 2004. – 463 с.
- Игнатъевский Н.Ф. Определение значений коэффициента трения кормовой смеси методом планирования эксперимента / Н.Ф. Игнатъевский, В.Н. Острецов // Механизация производственных процессов в животноводстве: сб. науч. тр. ЛСХИ. – Л.; Пушкин, 1977. – Т. 336. – 64 с.
- Новиков В.В. Исследование рабочего процесса и обоснования параметров пресс-экструдера для приготовления карбамидного концентрата: дис. ... к.т.н. / В.В. Новиков. – Саратов: СИМСХ, 1981. – 157 с.