

## К вопросу анализа функциональной специфики дробильных устройств с боковым расположением выгрузных зон

*В.А. Шахов, д.т.н., профессор, Ю.А. Ушаков, д.т.н., профессор, А.А. Петров, к.т.н., А.Ф. Абдюкаева, к.т.н., Д.В. Наумов, преподаватель-исследователь, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

В настоящее время сформулированы различные аналитические положения в области развития путей снижения энергозатрат и расширения функциональных возможностей молотковых дробилок закрытого типа. Аспект на совершенствование рабочего процесса, в основу которого положена оптимизация энергетического уровня разрушения зернового материала, является преобладающим в работах многих авторов по теории дробления. Однако анализ и формализация собственно процесса движения зерновой массы при её разрушении проводились акцентно второстепенно, несмотря на то что от маршрутизации потоков зависит как эффективность взаимодействия с дробящими элементами, так и производительность

при эвакуации из рабочей камеры кондиционного материала [1–3].

Исследованиями установлено, что характер перемещения зернового материала в условиях многократного ударно-стирающего воздействия рабочих органов и ограниченной пропускной способности решета во многом определяет концентрация случайных или системных возмущений циркулирующего воздушного потока, реализующих переходное состояние по критической величине числа Рейнольдса, от ламинарного к турбулентному и обратно [1, 2, 4].

Учитывая, что энергетические и качественные характеристики технологического процесса измельчения во многом определяются оптимальным соотношением трёх показателей –затрат энергии на разрушение, степени измельчения и пропускной способности, особый научный интерес представляет использование потенциала центробежной силы и сил инерции, влияющих на формирование

послойной структуры переработанного материала и эвакуации кондиционной массы из рабочей камеры. Это имеет доминирующее значение для интенсификации технологического процесса сепарации зерна, снижения энергоёмкости процесса измельчения и улучшения фракционного состава продуктов помола.

**Цель исследования** – определить закономерности образования помольной смеси и её организацию в слоистую структуру при реализации технологического процесса измельчения.

В этой связи исследование было направлено на установление режимных параметров, определяющих характер и интенсивность образования кондиционной массы. Тогда логично утверждать, что системному анализу должен подвергаться любой путь исследования, направленный на коррекцию траектории кондиционного слоя с целью обеспечения его эвакуации из рабочей камеры.

При оценке уровня релевантности реализации поисковых и исследовательских процедур авторы пришли к выводу о недостаточности использования какой-то одной из существующих методик для анализа исследуемого процесса. В данном случае речь идёт о проведении анализа эксплуатационной технологичности функциональных элементов рабочей камеры при формировании кондиционной фракции.

Постановка вопроса такова, что требуется комбинированный подход с формированием двух системных алгоритмов. И если заключительный этап предполагает моделирование и расчёт технологической реализации схемотехнического решения процесса эвакуации зерноматериала в заданных режимных интервалах, то алгоритм предварительного анализа создаётся для оценки готовности фракционных ингредиентных частиц по своим геометрическим и энергетическим характеристикам к взаимодействию с техническими элементами системы управления воздушно-продуктовым потоком и подачей переработанного зернового сырья в выгрузную зону к сепарирующим решёткам [1, 2, 3].

Достоверно можно утверждать, что основоположниками теории изменения состояния измельчаемого материала в рабочей камере дробильной машины считаются учёные В.И. Сыроватка, Ф.Г. Плохов и Г.И. Шуб. Но дальнейшее развитие аналитических основ, в том числе формализация методов определения условий взаимодействия измельчаемого материала с молотками и поверхностью рабочей камеры, представлено в современных работах разнотипно, в узкоприкладном аспекте по конкретной технической проблеме. При таком выражении аналитических процедур затруднительно оценивать состояние развития технологического процесса.

Само понятие подготовки сырья к эвакуации в исследовательском смысле можно интерпретировать как оценку мощностных характеристик ингредиентных частиц при переходе через плоскость сепарирующего решета.

**Материал и методы исследования.** При решении задачи создания алгоритма расчётно-конструкторских процедур, связанной с анализом процесса измельчения кормового сырья, целесообразно использование метода формализации базовых теоретических концепций описания технологии измельчения как абстрагированного процесса с практическим выходом на послойную дифференциацию переработанной массы.

Процесс послойной дифференциации в рабочей камере дробильной машины следует рассматривать как случайный для отдельных условных зон. Особенностью заданных условий является идентичность признаков, выраженных средними значениями, в интервале приближения к которым происходят колебания, и средним размахом этих колебаний. Произвольная порциальная выборка зерноматериала в рамках установленного периода позволила достоверно описать характеристики случайного процесса в исследуемой зоне рабочей камеры дробилки. Такая аналитика необходима для создания схемотехнического решения энергосберегающей и высокотехнологичной конструкции дробильного устройства инновационного типа. Предлагаемая математическая процедура основана на определении приближённого значения математического ожидания посредством осреднения значений выборки по оси абсциссы и приближённого значения дисперсии как осреднения квадратов отклонений от названного выше среднего [5].

**Результаты исследования.** Искомые математические характеристики, формализованные выражениями для практической реализации и дальнейшего формирования расчётного алгоритма, имеющего вид:

$$m_x^i \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad (1)$$

были подвергнуты аналитическому преобразованию с заменой интеграла конечной суммы, что арифметически достигнуто делением интервала времени на  $n$  равных частей длительностью  $\Delta t$  (с условным обозначением середины отрезков:  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ).

В основу дальнейшего структурирования выражения был положен принцип формирования исходного интеграла в виде суммы интегралов по элементарным участкам  $\Delta t$  с вынесением на каждом из них функции из-под знака интеграла по среднему значению, соответствующему центрам интервалов разбиения:

$$m_x^i \approx \frac{1}{T} \cdot \frac{T}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i). \quad (2)$$

Дальнейшие математические преобразования имеют целью определить дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайного процесса  $x(t)$ . Формируя вторую степень  $\dot{x}_i(t)$  и получив частное суммы по  $n$ , установили, что:

$$D_x^i = \frac{\sum_{i=1}^n (\dot{x}_i(t_i))^2}{2}; \sigma_x^i = \sqrt{D_x^i}. \quad (3)$$

Произведение значений, разделённых интервалом  $\tau$ , и сумма произведений, отнесённая соответственно к  $(n - 1)$ ,  $(n - 2)$  ..., при дальнейшей формализации позволяют установить значения корреляционной функции  $k_x^i(\tau)$ :

$$\tau = m \cdot \Delta t = \frac{m \cdot T}{n}, \quad (4)$$

где принципиально необходимо учитывать, что соответствует количеству частей  $\Delta t$  интервала времени  $T$ . Следовательно:

$$k_x^i(\tau) = \frac{1}{n-m} \cdot \sum_{i=1}^{n-m} \dot{x}(t_i) \cdot \dot{x}(t_{i+m}). \quad (5)$$

После нормирования корреляционной функции создаются условия для группировки значений и графической визуализации послойного фракционирования перерабатываемой массы зерноматериала (рис. 1).

Нет необходимости учитывать аномальные отклонения эмпирически полученных значений функции  $\rho_x^{*i}(\tau)$ , параметры которой достоверно подбираются методом наименьших квадратов. Отсюда нормированная спектральная плотность случайного процесса фракционного категорирования продуктового потока  $x_i(t)$  имеет выражение:

$$S_x^{*i} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} k_x^i(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (6)$$

Таким образом, с использованием предлагаемого метода возможно создание аналитической модели послойного распределения разнофракционных частиц воздушно-продуктового потока с идентификацией участка функции, в том числе и по плотностным параметрам исследуемого слоя в пределах гипотетического интервала его формирования. Целесообразность предлагаемого подхода к созданию алгоритма расчётно-конструкторских процедур очевидна, поскольку позволяет сократить число повторений на этапе выполнения физического образца, а предлагаемое схмотехническое решение будущего изделия-зернодробилки, уже на уровне проектной документации, параметрически адекватно технологическому режиму управления

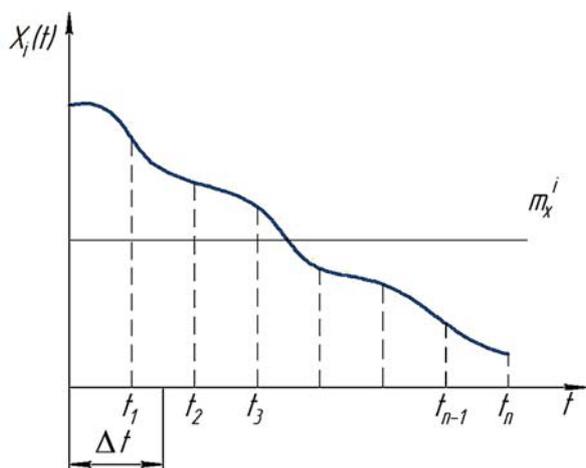


Рис. 1 – Изображение фрагмента структурного распределения зерноматериала в исследуемой зоне рабочей камеры зернодробилки

кондиционным слоем с подачей ингредиентных частиц воздушно-продуктового потока в зону эвакуации.

В соответствии с предлагаемым схмотехническим решением молотковой дробилки рассматривать и формализовать механику прохода частиц через донное сепарирующее решето не предполагается в связи со специфичным боковым расположением выгрузных зон [6]. Тем не менее в алгоритме не исключается анализ мощностных затрат на трение периферийного циркулирующего слоя, состоящего из крупных некодиционных частиц, по кольцевой поверхности корпуса рабочей камеры.

Уже созданные модели рабочего процесса дробильных машин, подтверждённые экспериментальными исследованиями, вполне достоверно принимают постулат о плотности материала, линейно зависящей от толщины слоя как вещества с равномерно распределёнными частицами, псевдосвязанными друг с другом, и увеличивающейся по мере удаления от центра вращения [7].

Для проведения аналитических процедур достаточно сформировать модель процесса по принципу трёхслойного синтеза кольцевого потока в виде концентрических окружностей (рис. 2).

Техническая специфика – наличие в камере дробилки разделителя для латерализации (бокового увода) продуктового потока – предполагает выделение в расчётной схеме элементарного кольца высотой  $\delta$  (по высоте изогнутой поверхности) и шириной  $b$  (ширина рабочей камеры), на которое будет воздействовать центробежная сила:

$$F_{ц} = m_k \cdot \omega_3^2 \cdot R_{разд} = m_k \cdot \frac{V_3^2}{R_{разд}}, \quad (7)$$

где  $m_k$  – совокупная масса ингредиентных частиц кондиционного слоя;

$\omega_3$  – угловая скорость кондиционного слоя;

$R_{разд}$  – средний радиус до поверхности разделителя;

$V_3$  – линейная скорость кондиционного слоя.

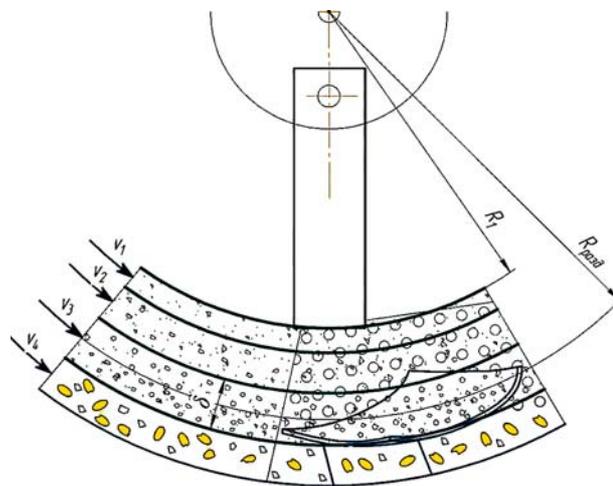


Рис. 2 – Схема кольцевых слоёв в молотковой дробилке

Дальнейшая формализация представляет возможность дать оценку:

а) силе трения циркулирующего слоя по поверхности разделителя потоков:

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{разд}} \cdot m_{\text{к}} \cdot \omega_3^2 \cdot R_{\text{разд}} = f_{\text{разд}} \cdot m_{\text{к}} \cdot \frac{V_3^2}{R_{\text{разд}}}, \quad (8)$$

где  $f_{\text{разд}}$  – коэффициент трения движения продукта о поверхность разделителя;

б) моменту трения относительно поверхности разделителя потоков относительно поверхности разделителя потоков:

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot R_{\text{разд}} = f_{\text{разд}} \cdot m_{\text{к}} \cdot V_3^2; \quad (9)$$

в) мощности, затрачиваемой на трение по поверхности разделителя потоков:

$$N_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \cdot \omega_3^2 = f_{\text{разд}} \cdot m_{\text{к}} \cdot V_3^2 \cdot \omega_3. \quad (10)$$

Однако переходным (связующим) параметром мощностных характеристик исследуемого процесса с технико-экономическими показателями (выгрузной динамикой) являются скорость перемещения ингредиентных частиц потока по отражающей поверхности разделителя. Согласно теории синтеза трёх слоёв частицы, находящиеся в воздушно-продуктовом потоке, совершают скользящие движения друг относительно друга и находятся в динамическом контакте. Кинетическая энергия по центробежному вектору передаётся от верхних слоёв к соседним нижним за счёт трения, возникающего между ними, при пропорциональном снижении их скоростных показателей. Принимая во внимание, что скорость нижнего слоя пропорциональна коэффициенту трения между слоями, можно сделать прикладное утверждение: для слоя, движущегося за счёт контактного соприкосновения его частиц с кромкой молотка:

$$V_1 = \omega_1 \cdot R_1 \cdot f_{\text{м}}; \quad (11)$$

для слоя, движущегося за счёт трения по нему первого слоя:

$$V_2 = V_1 \cdot f_1 = \omega_1 \cdot R_1 \cdot f_{\text{м}} \cdot f_1; \quad (12)$$

для слоя, движущегося за счёт трения по нему второго слоя:

$$V_3 = V_2 \cdot f_2 = \omega_1 \cdot R_1 \cdot f_{\text{м}} \cdot f_1 \cdot f_2; \quad (13)$$

для слоя, движущегося непосредственно по поверхности разделителя:

$$V_3 = V_3 \cdot f_{\text{разд}} = \omega_1 \cdot R_1 \cdot f_{\text{м}} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_{\text{разд}}, \quad (14)$$

где  $f_{\text{м}}$  – коэффициент трения движения поверхности молотка по продукту;

$f_1$  и  $f_2$  – коэффициенты трения движения между первым и вторым и между вторым и третьим слоями соответственно;

$f_{\text{разд}}$  – коэффициент трения движения продукта по поверхности разделителя.

**Вывод.** Предлагаемые аналитические варианты определения закономерностей образования помольной смеси и её организации в слоистую структуру при реализации технологического процесса измельчения зерновой массы являются основой теории оптимизации конструктивно-режимных параметров системы управления траекторией подачи кондиционных частиц в выгрузную зону. Такой подход является целесообразным для дальнейшей формализации расчётно-проектировочных процедур в параметрические интервалы, ориентированные на технико-экономическую эффективность предлагаемого конструктивного решения.

## Литература

1. Асманкин Е.М. Кинематические и динамические аспекты взаимодействия ингредиентных частиц с функциональными элементами рабочей камеры измельчителя зернового материала / Е.М. Асманкин, Ю.А. Ушаков, А.Ф. Абдюкаева [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3. С. 87–89.
2. Чкалова М.В. Определение количественных параметров воздушно-продуктового слоя в рабочей камере измельчителя / М.В. Чкалова, В.А. Шахов, Е.М. Бурлуцкий [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2017. № 12. Т. 31. С. 57–61.
3. Филатов М.И., Шахов В.А., Петров А.А. Способы повышения надёжности молотков кормодробилок // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2007. № 3. С. 63–65.
4. Пат. на полезную модель RUS № 51900 12.05.2004. Лабораторная установка для исследования процесса дробления кормов / М.И. Филатов, М.И. Бабьева, А.А. Петров, В.А. Шахов. Оpubл. 10.03.2006 г. Бюл. № 7.
5. Бурлуцкий Е.М., Павлидис В.Д., Чкалова М.В. Математическое моделирование технологии и технических средств измельчения кормового сырья: монография. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2010. 177 с.
6. Пат. на полезную модель № 173615 РФ. Дробилка зерна / Е.М. Асманкин, Ю.А. Ушаков, Д.В. Наумов, А.А. Петров, В.Е. Медведев. Оpubл. 04.09.2017. Бюл. № 25.
7. Сундеев Л.Л., Певнев В.Г. Теоретические предпосылки исследования процесса измельчения зерна в рабочей камере молотковой дробилки. Совершенствование технологий и технических средств производства продукции растениеводства и животноводства // Сборник научных трудов ВГАУ им. К.Д. Глинки. 1997. С. 172–177.