

ЭНЕРГОДИНАМИКА ПЛОСКИХ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ РЕШЁТ

В. А. Патрин, кандидат технических наук, профессор

А. В. Патрин, кандидат технических наук

Новосибирский государственный аграрный университет

E-mail: patrin.a@bk.ru

Ключевые слова: плоское решето, зерновая среда, энергодинамика системы «решето – обрабатываемое зерно»

Реферат. Предложен новый синергетический метод описания поведения зерновой среды на плоских колеблющихся решётах. Получены три уравнения, позволяющие моделировать процесс передачи энергии от поверхности решета в зерновую среду и образование потенциальной и свободной энергии в обрабатываемом зерне. Доказано, что система «плоское решето – обрабатываемое зерно» обладает элементами самоорганизации и за один полупериод колебания имеет четыре сменяющих друг друга режима движения зерна. Первое уравнение показывает баланс энергии в системе, её направление перехода и трансформацию. Второе уравнение определяет закономерности поступления энергии от рабочего органа в обрабатываемую среду и отражает процесс самоорганизации системы. Третье уравнение описывает равновесие действующих сил, силы инерции и силы сопротивления сдвигу каждого элементарного слоя зерна в зависимости от его местонахождения в сыпучем теле. Получена зависимость времени полупериода колебания и ускорения силы инерции от угловой скорости привода плоского решета. Предложены направления совершенствования плоских решёт за счёт увеличения амплитуды колебания, снижения оборотов кривошипа привода решета, увеличения нагрузки зерна на решете, повышения коэффициента трения поверхности решета.

Определение закономерностей взаимодействия обрабатываемого зерна с рабочими органами сортировальных машин представляет сложную задачу, которая не решается существующими методами классической механики, поэтому теория процесса сепарации зерна сводилась к изучению движения материальной точки по поверхности рабочего органа.

Любой рабочий орган сортировальных машин и обрабатываемая сыпучая среда представляют собой открытую нелинейную диссипативную систему с элементами самоорганизации и авторегулирования.

Поведение сыпучей среды подобно поведению плазмы, жидкости и атмосферным явлениям.

При незначительном изменении управляющих параметров в сыпучей среде появляются новые структурные образования, новые виды движения частиц, новые фазовые состояния сыпучей среды, объяснить которые с позиций классической механики затруднительно.

Цель настоящей работы заключается в проведении качественного анализа системы уравнений, полученной авторами, для определения оптимальных режимов работы плоских колеблющихся решёт.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ

На плоских колеблющихся решётах Блехман классифицировал семь регулярных режимов движения зерна [1]. В цилиндрических решётах авторами зафиксировано семь устойчивых видов движения и фазовых состояний зерновой среды, переходящих из одного вида в другой при изменении управляющего параметра [2].

В синергетике используется понятие «детерминированного хаоса», где нелинейные системы на локальных промежутках времени являются устойчивыми равновесными, а на более длительных участках проявляют неустойчивость, обострение порядка, хаос, которые в точках бифуркаций сменяются новым порядком.

Э. Лоренц составил систему уравнений, описывающих атмосферные явления, которые оказались пригодными и для описания течения жидкости в ячейках Бинара [3].

Авторами получена система уравнений, соответствующая правилам синергетики для описания взаимодействия зерновой среды с плоскими решётами [4]:

$$E_{\text{вн}} \rightarrow \Pi \rightarrow E_{\text{вн}} = F + ST, \quad (1)$$

$$E_{\text{вн}} = (aw - bw^2) \cdot K_{\text{н}} \quad (2)$$

$$F_{\text{д}} = F_j - F_{\text{с}} \quad (3)$$

где $E_{\text{вн}}$ – внешняя кинетическая энергия, передаваемая решетом в систему;

Π – потенциальная энергия зерна, переходящая в кинетическую энергию зерна $E_{\text{вн}}$;

F – свободная энергия, направленная на перемещение зерна;

$ST = Q$ – энтропия, или тепловые потери в результате трения и остаточной деформации зерна;

w – угловая скорость привода решета;

a, b – коэффициенты, учитывающие интенсивность поступления энергии в зерновую среду;

$K_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий нагрузку зерна на решето;

$F_{\text{д}}$ – движущая сила;

F_j – сила инерции;

$F_{\text{с}}$ – сила сопротивления зерна сдвигу.

Первое уравнение системы (1) показывает направление перехода и трансформацию энергии в системе.

Анализ показал, что внешняя энергия $E_{\text{вн}}$ у всех рабочих органов сортировальных машин переходит во внутреннюю кинетическую энергию зерновой среды $E_{\text{вн}}$ через обязательное накопление потенциальной энергии Π . Правая часть данного уравнения представляет термодинамический потенциал Гельмгольца. Количество свободной энергии определяет порядок системы, в который входит структура сыпучей среды, вид движения, устойчивость траекторий частиц и т.д. Свободная энергия и энтропия являются конкурентными, увеличение одного ведёт к уменьшению другого вида энергии. Управляющим параметром системы, определяющим количество свободной энергии в обрабатываемом зерне, является кинематический режим решета (угловая скорость кривошипа) и величина нагрузки зерна на решето.

Закономерность поступления энергии в зерновую среду от поверхности рабочего органа определяется уравнением (2). Данное уравнение отражает процесс самоорганизации системы и взаимодействие её с внешней средой. Вывод уравнения дан в работе [2].

На первом этапе функционирования системы увеличение угловой скорости (aw) повышает количество свободной энергии в зерне, на втором этапе отрицательная величина ($-bw^2$) обеспечива-

ет обратную связь в саморегулирующейся системе и снижает количество энергии, поступающей в зерновую среду. Физический смысл данного явления основан на противоречии: чем больше разрыхляется (псевдооживляется) сыпучая среда, тем больше она теряет связь между частицами зерновой среды и между зерновым телом и поверхностью решета. При этом уменьшаются силы трения, следовательно, уменьшается и количество передаваемой энергии от решета зерновой среде, снижается интенсивность сепарации. Возникает тупиковая ситуация: чтобы интенсифицировать процесс сепарации, необходимо больше сообщить энергии частицам сыпучей среды, в то же время при увеличении скорости (w) рабочего органа поступление энергии в зерно с определённого момента начинает уменьшаться.

Третье уравнение системы (3) по правилам синергетики составляется из условия равновесия действующих сил и сил сопротивления движению. Тот или иной порядок в системе зависит от величины силового поля, в котором находится зерновая среда. В нашем случае это переменное поле состоит из векторных величин ускорения силы тяжести и силы инерции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Движущей силой является результирующая двух сил: активной силы инерции F_j и силы сопротивления сдвигу $F_{\text{с}}$ элементарного слоя. Если принять массу $m = 1$, то удельная сила сопротивления сдвигу любого элементарного слоя по наклонному решету определится как приведённый коэффициент трения [1]:

$$\text{вниз} - f_{\text{пр.н}} = f_{\text{он}} (1 + 2\epsilon i); \quad (4)$$

$$\text{вверх} - f_{\text{пр.в}} = f_{\text{ов}} (1 + 2\epsilon i), \quad (5)$$

где $f_{\text{он}}$ – удельное сопротивление сдвигу верхнего слоя вниз по решету

$$f_{\text{он}} = \sin(\varphi - \alpha) / \cos(\alpha - \varphi), \quad (6)$$

$f_{\text{ов}}$ – удельное сопротивление сдвигу верхнего слоя вверх по решету

$$f_{\text{ов}} = \text{tg}(\alpha + \varphi); \quad (7)$$

где α – угол наклона решета;

φ – угол трения зерна по решету;

$i = h/n$ – безразмерная координата рассматриваемого слоя зерна, лежащего на глубине h при толщине зерна n на решетке;

ε – коэффициент, характеризующий физико-механические свойства зерна,
 $\varepsilon = (0,156 \div 0,215)$.

Ускорение решета, при котором начинает сдвигаться элементарный слой:

$$w_1^2 A = g f_{\text{пр.н}} - \text{вниз по решетку}; \quad (8)$$

$$w_2^2 A = g f_{\text{пр.в}} - \text{вверх по решетку}; \quad (9)$$

где A – амплитуда колебания решётного стана (таблица).

Авторами разработана имитационно-графическая модель для исследования режимов движения зерна на плоском решетке [4], в которой за один полупериод колебания решета последовательно сменяются четыре фазы движения: относительный покой зерна на решетке, послынное сдвиговое течение с отставанием от нижнего слоя, свободное перемещение зернового тела относительно поверхности решета, послынное сдвиговое течение с опережением нижнего слоя.

Каждое фазовое состояние зерна на поверхности плоского решета выполняет свою функцию в процессе сепарации.

Фаза относительного покоя зерна на решетке необходима для накопления потенциальной энергии. Энергия переносного движения решета переходит в потенциальную энергию массы зерна, находящегося, так же как и решето, в переносном движении.

Две фазы относительного сдвигового течения элементарных слоёв зерна внутри зернового тела обеспечивают разрыхление (псевдооживление) сыпучей среды, во время которого мелкие частицы перемещаются к поверхности решета.

Фаза относительного перемещения сыпучей среды как «твёрдого» тела по поверхности решета необходима для прохождения частиц через отверстия решета и удаления полученных фракций из машины.

Во всех перечисленных фазовых состояниях обрабатываемого зерна наблюдается когерентное (согласованное) поведение множества частиц. Обоснование согласованности поведения частиц на микроуровне дано авторами в работе [4]. Таким образом, невыполнение любой фазы движения зерна из перечисленных выше приведёт к нарушению процесса сепарации, разрушению системы. Важно оценить время, в течение которого

совершается полный цикл смены фаз движения зерна и определить его зависимость от угловой скорости.

При гармонических колебаниях плоского решета ускорение j и сила инерции определяются из уравнений

$$j = -Aw^2 \sin wt; \quad (10)$$

$$F_j = mAw^2 \sin wt,$$

где A – амплитуда колебаний;

w – угловая скорость;

wt – угол поворота кривошипа.

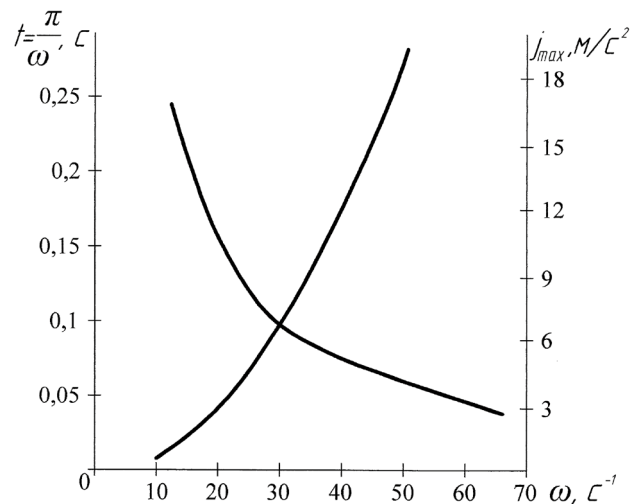
Максимальные значения ускорения и силы инерции определяются как

$$j_{\text{max}} = -Aw^2; F_j = mAw^2. \quad (11)$$

Время полупериода колебания

$$T/2 = \pi/w. \quad (12)$$

Используя выражения (11) и (12), построим график зависимости времени полупериода колебания $T/2$ и ускорения j_{max} от угловой скорости кривошипа решета (рисунок).



Зависимость времени полупериода колебания и ускорения плоского решета от угловой скорости кривошипа при $A = 7,5$ мм

Из таблицы и графика видно, что время полупериода колебания в реальных машинах составляет всего 0,06–0,08 с. За это время сыпучая среда должна пройти все четыре перечисленных выше фазовых состояния, необходимых для сепарации.

Слабым звеном плоских решёт с горизонтальными колебаниями является снижение количества передаваемой энергии от решета в обра-

Кинематика решётных станов зерноочистительных машин

Марка	Обороты, частота колебаний, n , мин ⁻¹	Амплитуда колебаний решёт, A , мм	$w = \frac{\pi n}{30}$, с ⁻¹	Ускорение $j = Aw^2$, м/с ²	Время полупериода колебания $t = \pi/w$, с
ОВС-25	460	7,5	48	17,28	0,065
СМ-4	418	7,5	43,75	14,3	0,07
ЗАВ-10.30000	440	7,5	46,05	15,87	0,068
ЗСМ-20	500	5,0	52,3	13,7	0,06

батываемое зерно. Данное явление можно сравнить с «буксованием» решета относительно зерна и проскальзыванием одного элементарного слоя относительно другого. По мнению авторов, теоретически выйти из данной ситуации можно:

а) не изменяя величину ускорения и силы инерции, уменьшить угловую скорость, увеличив при этом амплитуду колебаний решета;

б) увеличить шероховатость поверхности решёт. В процессе работы поверхность решета шлифуется зерном, усугубляя процесс сепарации.

Почему вибрационные решёта работают успешно при колебаниях на порядок выше, чем решёта с горизонтальными колебаниями? Теоретически это объясняется разными способами передачи энергии зерну. В первом случае энергия от поверхности решета передаётся за счёт удара (импульса силы). Сила импульса почти перпендикулярна зерновому «телу», и время её действия на зерно не играет большой роли. В колеблющихся решётах передача энергии зерну осуществляется силами трения.

Экспериментальные исследования показали, что передача движения силами трения заканчивается на пятом–шестом слое сыпучей среды. При работе вибрационных решёт передача движения частицам от импульса силы (ударом) распространяется на толщину слоя зерна 4–5 см. Дальше энергия рабочего органа не передаётся, гасится

в поровых промежутках между частицами зерновой среды.

ВЫВОДЫ

1. Полученные авторами синергетические уравнения достоверно описывают динамику перехода внешней энергии в обрабатываемую зерновую среду на плоских колеблющихся решётах.
2. Тот или иной порядок в системе (структура, вид движения зерна и его фазовое состояние) определяется количеством свободной энергии, переданной поверхностью решета зерну. Условия передачи энергии зерну зависят от угловой скорости решета и ускорения силы тяжести.
3. Время полупериода колебания решета, в течение которого зерновая среда должна пройти полный цикл сменяющихся поочерёдно четырёх фаз движения, необходимых для процесса сепарации, у существующих сортировальных машин составляет всего 0,06–0,07 с, что, по мнению авторов, является недостаточным.
4. Повысить удельную производительность плоских решёт можно за счёт увеличения амплитуды колебания решета, нагрузки зерна на решете, увеличения коэффициента трения зерна по поверхности решета при снижении оборотов привода решета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гортинский В. В., Демской А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1980. – 303 с.
2. Патрин В. А., Крум В. А., Патрин А. В. Моделирование динамики взаимодействия зерновой среды и рабочих органов сортировальных машин // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2013. – № 2. – С. 4–7.
3. Данилов Ю. А. Лекции по нелинейной динамике. – М.: Либроком, 2011. – С. 56–62.
4. Патрин В. А. Синергетическая теория взаимодействия зерновой среды с плоскими решётами // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2013. – № 4. – С. 26–29.

ENERGY DYNAMICS OF OSCILLATING FLAT SIEVES

V.A. Patrin, A. V. Patrin

Key words: flat sieve, grain medium, energy dynamics of the system «sieve – treated grain»

Summary. The paper suggests a new synergy method to describe grain medium behavior on flat oscillating sieves. Three equations are made up which allow to model the process of energy transmission from the sieve surface to the grain medium and to produce potential and free energy in the treated grain. It is proved that the system «flat sieve – treated grain» has the elements of self-arrangement and four replacing each other regimes of grain movement for a single half-period of oscillating. The first equation shows the balance of energy in the system, direction of its transition and transformation. The second equation determines regulations of energy intake from the working organ to the treated medium and reflects the process of the system self-arrangement. The third equation describes the equilibrium of actuating forces, inertia forces and resistance forces towards the shift of each elementary grain layer depending on its location in the loose body. The relationship of the oscillation half-period time and inertia force acceleration to the angular velocity of the flat sieve driving gear is identified. The directions are proposed to improve flat sieves at the expense of increased oscillation amplitude, reduced turns of the sieve driving gear crank, increased grain load on the sieve, increased coefficient of the sieve surface friction.

УДК 631.3.3–192

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

С. В. Субочев, аспирант

А. Е. Немцев, доктор технических наук

И. В. Коптева, инженер

Сибирский НИИ механизации и электрификации
сельского хозяйства Россельхозакадемии

E-mail: sibime@ngs.ru

Ключевые слова: эффективность зерноуборочных комбайнов, критерий эффективности, удельные суммарные затраты, экономико-математическая модель, безотказность, наработка на отказ, время восстановления

Реферат. Необходимость поддержания работоспособности зерноуборочных комбайнов в течение всего периода функционирования в связи с усложнением их конструкции за счет применения автоматических и гидравлических устройств, электроники, увеличением производительности повышает значимость любого отказа машины по техническим причинам. Приведена методика оценки эффективности зерноуборочных комбайнов с учётом их основных критериев надёжности – безотказности и ремонтпригодности, а также других показателей по удельным суммарным затратам на гектар убранной площади. Представлены сравнительные результаты эффективности отечественных и некоторых импортных зерноуборочных комбайнов. На примере комбайна ACROS-540 показаны зависимости удельных суммарных затрат от основных показателей надёжности, характеризующихся наработкой на отказ и временем восстановления, а также от других показателей, влияющих на их эффективность: балансовой стоимости комбайна, срока эксплуатации, стоимости реализации продукции, урожайности культуры и продолжительности уборки. Исследования надёжности и эффективности зерноуборочных комбайнов проведены в Краснозерском районе Новосибирской области. Полученные результаты могут применяться хозяйствами области при комплектовании комбайнового парка как отечественными, так и импортными моделями.

Существующая сельскохозяйственная техника, несмотря на её постоянное совершенствова-

ние, нуждается в поддержании работоспособности в течение всего периода функционирования.