**II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОБРОБКА**

Калмыков М. А.

*Восточноукраинский  
национальный  
университет имени  
Владимира Даля*

УДК 621.9.048

**К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЦИРКУЛЯЦИОННОГО  
ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ  
ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ  
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ***В статье предлагается математические методы расчета перемещения детали в процессе вибрационной обработки. На основе предыдущих исследований поля скоростей перемещения сыпучей среды.**In the article the mathematical methods of calculation of moving of detail in the process of oscillation processing are offered, on the basis of previous researches of the velocity field of moving of friable environment.*

На сегодняшний день задача моделирования процесса вибрационной обработки все еще остается актуальной. Несмотря на наличие большого количества разработанных математических методов, возможности точного прогнозирования результата технологической операции в зависимости от начальных условий на данный момент не существует.

Эта задача еще более актуальна, когда речь идет о обработки крупногабаритных изделий, поскольку с увеличением объема загрузки эффекты связанные с поведением сыпучей среды как сплошного упруговязкопластичного тела оказывают значительное влияние. В связи с этим, наиболее остро стоит задача моделирования перемещения детали в контейнере, т.к. в условиях наличия зон с различной интенсивностью это обеспечит более равномерную обработку.

В работе [1] была предложена методика расчета скоростей перемещения рабочей среды по площади поперечного сечения контейнера, в зависимости от параметров работы вибрационного станка. Получаемые таким образом данные нельзя считать конечным результатом, поскольку они не характеризуют перемещение детали во время вибрационной обработки, а лишь показывают скорости движения рабочей среды по площади поперечного сечения контейнера.

Выводы о возможности применения того или иного режима обработки, для обеспечения стабильного перемешивания рабочей среды,

либо о влиянии конструкционных факторов могут быть сделаны лишь на основании анализа траектории перемещения детали.

Учитывая, что полученное в работе [1] векторное поле дискретно, аналитическое представление уравнений перемещения детали в контейнере невозможно.

Единственным приемлемым способом рассмотрения движения детали является непосредственное численное моделирование.

Для этого необходимо рассмотреть деталь, как она представлена в поперечном сечении контейнера (рис. 1).

Для расчета траектории предлагается использовать алгоритмы схожие с используемыми в компьютерных системах имитационного моделирования: пересчет основных динамических показателей на каждой итерации, или так называемом «тике», обозначающем дискретный отрезок времени.

Согласно рисунку перемещение детали может быть описано системой из трех обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$m_d \ddot{x}_d = \eta \sum_S (\dot{x}_{i,j} - v_{x_{i,j}})$$

$$m_d \ddot{y}_d = \eta \sum_S (\dot{y}_{i,j} - v_{y_{i,j}})$$

$$J_d \ddot{\phi}_d = \eta \sum_S \left( \dot{\phi}_{i,j} \sqrt{x_r^2 + y_r^2} - \frac{(v_{y_{i,j}} x_r - v_{x_{i,j}}) \sqrt{x_r^2 + y_r^2}}{\sqrt{\frac{x_r^2 + y_r^2}{x_r^2} x_r}} \right) \quad (1)$$

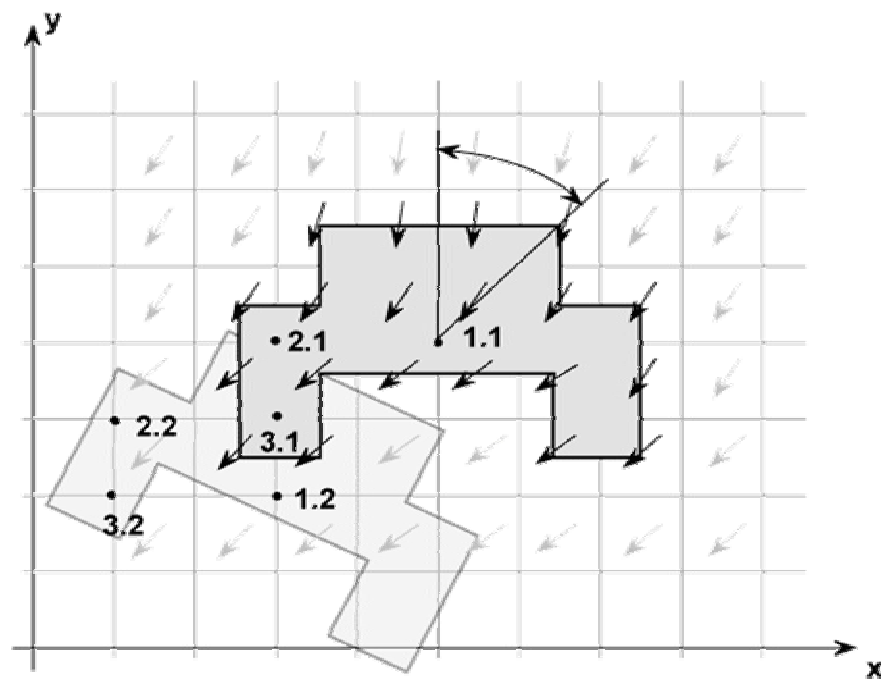


Рис. 1. Схема перемещения детали в потоке рабочей среды

где  $x_d, y_d$  – перемещение детали по соответствующим осям;

$x_r, y_r$  – расстояние от центра масс до точки принадлежащей изделию;

$S$  – площадь поперечного сечения детали, разбитая дискретной сеткой.

$m_d$  – масса детали;  $J_d$  – момент инерции детали.

Уравнения в данном случае не зависят друг от друга и представляют собой обыкновенные дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными, соответственно могут быть решены аналитически.

Поскольку речь идет о непосредственном численном моделировании, единицей перемещения детали будет деление сетки, на которую разбито векторное поле. Также выбирается короткий отрезок, используемый в качестве итератора.

Алгоритм расчета выглядит следующим образом:

1. Начальные условия  $x(0) = x_1, y(0) = y_1, \varphi(0) = 0, \dot{x}(0) = 0, \dot{y}(0) = 0, \dot{\varphi}(0) = 0, t_i = 0$  где  $x_1, y_1$  – начальная точка на поверхности рабочей среды, куда помещают деталь (точка 1.1, рис 1.).

2. На основе начальных условий, а также результатов расчета скоростей перемещения рабочей среды в каждой точке контейнера формируются уравнения (1), представляющие

собой интегральную сумму сил вязкости по площади поверхности изделия.

3. Время увеличивается на некое значение  $t_i = t_i + t_0$ .

4. Вычисляется новое положение точки (с округлением координат до ячеек сетки рис. 1.)

5. Если полученная точка отстоит более чем на 1 ячейку (например, точки 3.1, 3.2 рис. 2) либо остается в той же точке, значение  $t_0$  корректируется следующим образом:

$$t_0 = t_0 \pm \frac{t_0}{2}.$$

При попадании детали в зону, прилегающую к стенке контейнера, собственная скорость детали принимается равной 0.

6. Полученная точка добавляется в формируемую траекторию.

7. Для полученной точки вычисляются новые начальные условия.

Таким образом, будет сформирована траектория перемещения детали внутри контейнера в зависимости от основных факторов, а именно:

- амплитудно-частотных характеристик и траектории движения контейнера;
- формы контейнера, формы детали, объема загрузки;
- типа рабочей среды.

При реализации данного алгоритма в системе компьютерной математики, были приняты следующие начальные условия:

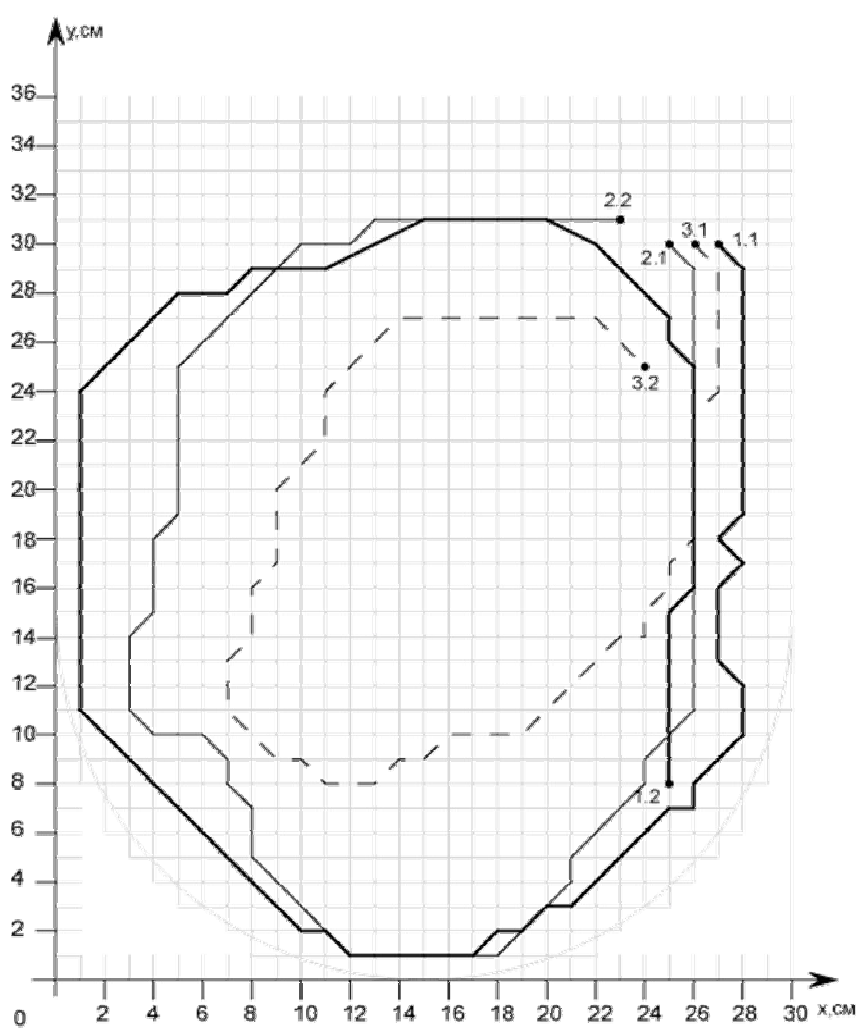
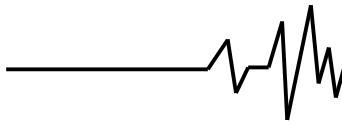
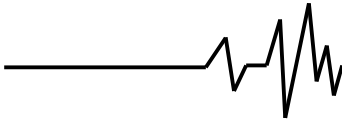


Рис. 2. Расчетная траектория движения деталей различного размера и формы

Для расчета согласно [1] поля скоростей:  
– ширина контейнера,  $l = 0,3$  м;  
– высота слоя загрузки,  $h = 0,3$  м;  
– поперечное сечение контейнера, строго U-образной формы;  
– скорость вращения вибровозбудителя колеблется в диапазоне,  $f = 34-67$  Гц;  
– радиус несбалансированной массы дебаланса,  $r = 0,04$  м;  
– расстояние от левой и правой подвесок до центра масс одинаково и составляет,  
по оси  $x$ ,  $l_{x1}, l_{xp} = 0,2$  м;  
по оси  $y$ ,  $l_y = 0,130$  м;  
– центр масс лежит на вертикальной оси симметрии, расстояние до вибровозбудителя по оси  $x$ ,  $k_x = 0$  м;  
по оси  $y$ ,  $k_y = 0,2$  м;  
– жесткость подвески:

по оси  $x$ ,  $c_x = 0,108 \cdot 10^6$  Н/м;  
по оси  $y$ ,  $c_y = 0,156 \cdot 10^6$  Н/м;  
– коэффициенты диссипации:  
по оси  $x$ ,  $h_x = 100 \cdot 10^3$  Н·с/м.  
по оси  $y$ ,  $h_y = 100 \cdot 10^3$  Н·с/м.  
Рабочая среда, Формованные тела ПТ-10, определяется следующими параметрами:  
– упругость поверхностного слоя,  $k = 30$  Н/м;  
– средняя вязкость в пределах частоты колебаний 40-50 гц,  $\eta, b = 1$  Н·м/с (зависит от частоты колебаний определяется согласно таблице [2])

Для расчетов зависимости циркуляционной скорости от коэффициента трения использовались следующие коэффициенты трения:  
Резина по камню (при наличии смазки)  
 $\mu_1 = 0,2$



Масса рассматриваемой детали 500 грам.

Расчет векторного поля, а также траектории движения детали проводился на режиме работы 50 Гц.

В рабочей среде выбиралось несколько характерных точек, после чего отслеживалось их перемещение в поле скоростей рабочей среды, для деталей различной формы. Результаты приведены на рис. 2.

Траектория с начальной точкой 1.1. характеризует перемещение детали соизмеримой размером и массой с гранулой ПТ-10. Для данного случая заданную одним элементом массива. Таким образом, перемещение детали повторяет перемещение элемента рабочей среды. Как видно практически нет перехода из одного слоя в другой.

Результаты данных расчетов будут во многом зависеть от параметров вибрации и свойств рабочей среды.

Предложенный подход является наиболее уместным учитывая специфику рассматриваемого процесса, в тоже время требует значительной доработки, связанной с возможностью проведения численных экспериментов в режиме реального времени.

Траектория, описываемая точкой 2.2. характеризует перемещение детали массой

300 г, формой соответствующей рисунку 1. В данном случае деталь движется ближе к центру контейнера, однако в конечном итоге она возвращается на исходную точку. Это связано с разностью скоростей в различных слоях рабочей среды, особенно у левой стенки контейнера.

Траектория изображенная пунктирной линией характеризует движение детали представляющей в поперечном сечении отрезок, длиной 110 мм и массой 1 кг. Как видно явления, прослеживающиеся в предыдущем примере еще более усугубляются, в результате разности скоростей траектория центра масс стремится к центру контейнера. Дальнейшие исследования показали, что деталь не выходит из этой области в течении всего цикла обработки.

#### **Список литературы**

1. Калмыков М.А. // Вибрации в технике и технологиях. – 2009. - № 1(53). – С.55-61.
2. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение: Монография. - Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. - 386 с.