Мицык В.Я.

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

УДК 621.9.048

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ГРАНУЛ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВИБРООБРАБОТКЕ

Наведено опис та вибір параметрів динамічної моделі руху робочого середовища у резервуарах віброустановок.

The description and choice of the parameters of dynamic model of working medium's motion in reservoirs of vibration installations has been given.

Практика виброобработки показывает, что на различных этапах решения технологических задач, связанных с проектированием процессов и оборудования для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки, необходимо определение широкого круга параметров, влияющих на эффективность и качество требуемого результата обработки.

К числу основных механических параметров в первую очередь следует отнести характеристики циркуляции гранул среды в колеблющемся резервуаре, а именно: скорость движения по определенному закону и силы взаимодействия в массе гранулированной среды. Приоритет таких параметров объясняется тем, что получаемый съем металла и шероховатость поверхности, количественно и качественно характеризующие технологию виброобработки, физически достигаются за счет взаимного давления и относительного перемещения гранул и деталей в слоях рабочей среды, помещенной в колеблющийся резервуар [1].

В классических исследованиях проф. Блехмана И.И. и проф. Бабичева А.П. существует общность объяснения механизма циркуляции рабочей среды, основанная на отождествлении с движением одной гранулы и ее воздействием на обрабатываемую поверхность [2, 3]. Такое направление развито и в других работах, в частности проф. Шаинского М.Е. [1].

Вместе с тем, необходимо отметить, что описание циркуляционного движения среды при виброобработке представляет собой сложную задачу, которая на сегодняшний день вряд ли может быть решена с достаточной точностью ввиду незавершенности разработки законов динамики сыпучей среды. В этой связи для описания поведения сыпучей обрабатывающей среды при виброобработке используются феноменологические модели, предложенные проф. Гончаревичем И.Ф. [4].

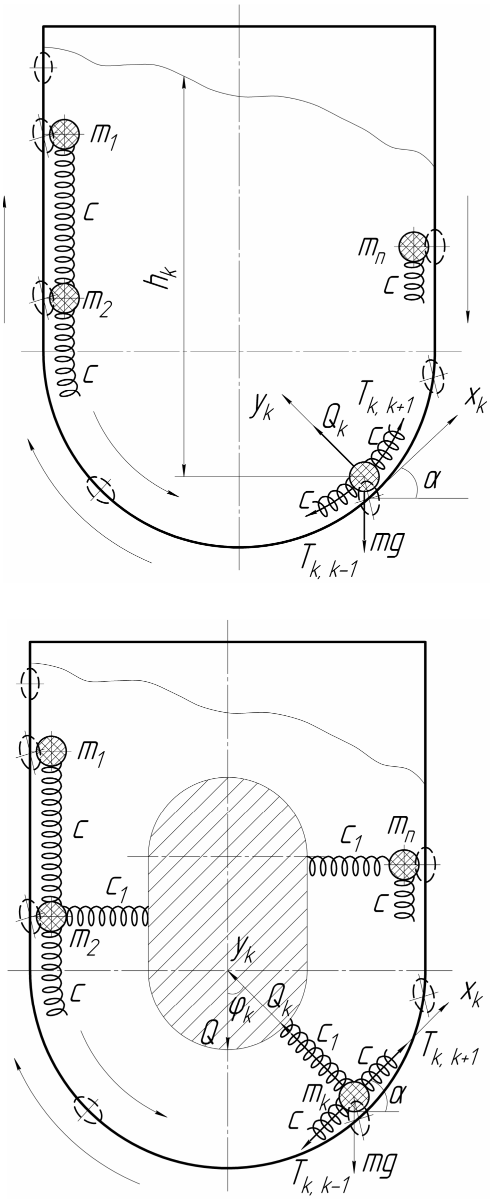
В НИЛ «ОСА» ВНУ им. В. Даля на основе и в продолжение работы [5] исследуется динамическая модель циркуляции рабочей среды при виброобработке в «U» - образном резервуаре, которая даст возможность получить выражения для средней скорости движения среды и оценить действующие в ней силы.

При динамическом моделировании проводится всесторонняя и комплексная оценка влияния формы рабочих поверхностей резервуара, то есть его стенок и днища, наличия в резервуаре дефлекторов рабочей среды, имеющих различную геометрическую форму и характер колебательного движения, а также влияние неоднородности поля траектории движения резервуара, что существенно при выборе параметров технологии и оборудования [6, 7].

В предлагаемой динамической модели (рис. 1) рабочая среда рассматривается в виде двух групп гранул. Первая группа является периферийной, она представляется в виде цепочки последовательно объединенных нежесткими упругими связями дискретных масс m, свободно размещенных на рабочих поверхностях резервуара (рис. 1, а). Эта группа гранул формирует граничный слой рабочей среды, находящийся в непосредственном контакте со стенками и днищем резервуара и совершающий движение, направленное противоположно их движению.

Вторая группа гранул находится в центральной части резервуара, то есть в зоне неактивной обработки, где наблюдается резкое снижение скоростей перемещения гранул и значительное падение внутренних давлений (рис. 1, б) [8]. Эта группа в традиционном «U» -

образном резервуаре не взаимодействует с его рабочими поверхностями и лишь оказывает некоторое статическое давление на гранулы граничного слоя среды или на массы, отнесенные нами в модели к первой группе.



а)

б)

Рис. 1. Динамическая модель рабочей среды в резервуаре виброустановки: (а) – периферийная часть рабочей среды; (б) – центральная часть рабочей среды

Как показывает скоростная киносъемка процесса, приведенное представление о рабочей среде, загруженной в колеблющийся резервуар, вполне правомерно. На кадрах киносъемки отчетливо наблюдаются две выделенные группы гранул. При этом гранулы периферийного слоя скользят по рабочим поверхностям резервуара, взаимодействуя с ними силами сухого трения, а также отрываются от этих поверхностей и соударяются с ними, совершая движения по петлеобразной траектории [9].

Число n масс m гранул первой группы выбирается достаточно большим, исходя из высокой точности воспроизведения неоднородности поля колебаний стенок и днища резервуара, а также изменения угла наклона рабочей поверхности к горизонту.

Суммарная масса nm выбирается на основе эксперимента и зависит от величины вибрационного ускорения и толщины слоя рабочей среды в резервуаре. В дальнейшем для полного рассмотрения технически возможного диапазона изменения технологических параметров виброобработки суммарная масса принимается равной $0,2...0,3$ от общей массы рабочей среды, загруженной в резервуар. Достоверность коэффициента μ, характеризующего отношение рассматриваемых масс, подлежит экспериментальной проверке.

В уравнениях динамической модели процесса движения гранул рабочей среды используются коэффициент R - восстановления скорости и λ - мгновенного трения, которые определяют соотношение между проекциями скоростей масс до и после соударения и выступают в качестве параметров, характеризующих взаимодействие гранул среды с колеблющейся рабочей поверхностью резервуара.

Использование именно этих постоянных определяется тем, что для режимов вибрационной обработки характерны движения среды с интенсивным «подбрасыванием», для которых, как показано в исследованиях проф. Лавендела Э.Э. [10], следует использовать λ - гипотезу. Конкретные значения постоянных величин R и λ принимаются такими же, как и в процессах транспортирования [2].

Поле колебаний рабочих поверхностей резервуара отвечает неоднородному характеру. В случае привода виброустановки от одного дебалансного вибратора такая неоднородность обусловлена его внецентровым расположением, причем резервуар будет двигаться по траекториям в виде эллипса с полуосями, размеры и наклон которых по отношению к горизонту будут изменяться [7].

В соответствии со сказанным ранее, помимо собственных сил тяжести, массы m граничного слоя среды оказываются прижатыми к рабочей поверхности резервуара статическими силами $\vec{Q}_к$, посредством которых учитывается давление гранул, находящихся в центральной части резервуара, на гранулы граничного слоя среды. Эти силы можно определить, либо считая их равными гидростатическому давлению на соответствующем участке рабочей поверхности резервуара, либо как реакции от опоры «ядра» среды на связанные с массами m нежесткими упругими связями C_1. Вес Q «ядра» при этом можно принять равным весу P всей загруженной среды за вычетом nmg - веса суммарной массы nm.

Дифференциальные уравнения относительного движения $к$-ой массы модели загрузки, отождествляемого с относительным движением гранулы по колеблющейся поверхности, имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_к = ma_к\omega^2\sin(\omega t-\varepsilon_к)-mg\sin\alpha_к+T_{к-1,к}-T_{к,к+1}+F; \\ m\ddot{y}_к = mb_к\omega^2\sin\omega t-mg\cos\alpha_к+N_к-Q_к, \end{cases} \quad (1)$$

где $a_к$, $b_к$ - амплитуды колебаний точки поверхности резервуара в месте расположения $К$-ой массы модели вдоль осей $x_к$ и $y_к$; $\varepsilon_к$ - сдвиг фаз между составляющими колебаний; $Q_к$ - статическая сила давления «ядра» рабочей среды на массы m; $T_{к-1,к}$, $T_{к,к+1}$ - силы взаимодействия между массами; F - сила сухого трения; $N_к$ - нормальная реакция.

При $y_к \equiv 0$ $N_к = mg\cos\alpha_к - mb_к\omega^2\sin\omega t + Q_к$,

$F(\dot{x}_к) = fN_к sign\dot{x}_к$ при $\dot{x}_к \neq 0$

$\left|F(\dot{x}_к)\right| < f_1 N_к$ при $\dot{x}_к = 0$.

При $\dot{y}_к > 0$ $F(\dot{x}_к) \equiv N_к \equiv 0$.

Правые части уравнений (1) представляют собой суммы проекций сил, действующих на $к$-ю массу гранул рабочей среды. Как видно, эти силы по оказываемому ими влиянию на движение рабочей среды различны, и их можно условно разделить на две группы: «медленные», зависящие от «медленного» времени t, и «быстрые», зависящие от «быстрого» времени ωt. Тогда движение рабочей среды под действием колеблющегося резервуара можно представить как состоящее из «быстрых» колебаний случайного характера и из сравнительно медленного циркуляционного движения.

Описанная выше модель предназначена для описания циркуляционного движения, исследование которого целесообразно выполнять с помощью метода разделения движения [11].

Характер суммарного движения можно представить следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x_к = V_к(t)+\varphi_к(\omega t,t) \\ y_к = \psi_к(\omega t,t) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\varphi_к(\omega t,t)$ и $\psi_к(\omega t,t)$ - «быстрые» периодические функции; $V_к(t)$ - «медленная» составляющая скорости.

Уравнение медленного движения некоторой $к$-ой массы модели получается путем добавления ко всем действующим на эту массу «медленным» силам некоторой дополнительной силы $W_к$, характеризующей влияние «быстрых» сил на медленное движение и вызываемой возмущающей силой. «Медленными» являются силы тяжести $m\vec{g}$, сила давления $\vec{Q}_к$ и силы взаимодействия между массами $\vec{T}_{к-1,к}$, $\vec{T}_{к,к+1}$, передаваемые через упругие элементы. К «быстрым» относится сила инерции в относительном движении массы m по поверхности резервуара и сила сухого трения.

В результате использования метода прямого разделения движений уравнение медленного движения $к$-ой массы модели в проекции на касательную поверхности резервуара будет представлено в виде:

$$m\dot{V}_к = -mg\sin\alpha_к + T_{к-1,к} - T_{к,к+1} - W_к(V_к). \quad (3)$$

Положение масс до и после сближения при движении по рабочей поверхности резервуара представлено на рис. 2, где $S_к$ и $V_к = \dot{S}_к$, соответственно, дуговая координата и скорость медленного движения $к$-ой массы.

$$T_{к-1,к} = C\Delta_{к-1,к} \quad \left(к=1,...,n;\ T_{0,1}=T_{n,n+1}=0\right), \quad (4)$$

где $\Delta_{к-1,к} \approx S_{к-1} - S_к + a$ - сближение $к-1$-ой и $к$-ой массы по сравнению с расстоянием a, при котором упругие элементы не деформированы; $\alpha_к$ - угол наклона поверхности резервуара к горизонту в месте расположения $к$-ой массы; $W_к(V_к)$ - возмущающая сила.

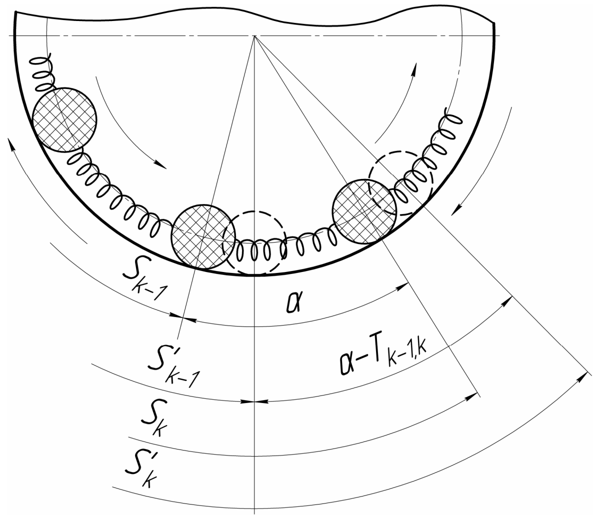


Рис. 2. Положение масс до и после сближения

При составлении уравнений принимается, что радиус кривизны поверхности резервуара в каждой ее точке значительно превышает перемещение масс в течение периода колебаний. Таим образом, движение каждой массы можно рассматривать как движение не по плоскости, касательной к поверхности в месте расположения данной массы.

Зависящая от скорости V_κ величина возмущающей силы W_κ может быть найдена, если известны решения задачи об определении средней скорости движения массы m по колеблющейся плоскости, угол наклона которой к горизонту и параметры колебаний которой совпадают с таковыми в месте расположения рассматриваемой массы, на которую действуют силы $\vec{Q}_\kappa$, $T_{\kappa-1,\kappa}$ и $T_{\kappa,\kappa+1}$.

Уравнения (3) и (4) при учете соотношений $\Delta_{\kappa-1,\kappa} \approx S_{\kappa-1} - S_\kappa + a$, $V_\kappa = \dot{S}_\kappa$ образуют замкнутую систему, из которой при заданных начальных условиях можно найти движение каждой массы $S_\kappa = S_\kappa(t)$.

В рассматриваемых циркуляционных движениях углы наклона α_κ, а также параметры колебаний точек поверхности резервуара для каждой массы изменяются настолько медленно, что их зависимость от времени при решении уравнения (3) можно учитывать параметрически. Тогда для указанных квазистационарных движений в уравнении (3) допустимо полагать, что $\dot{V}_\kappa = 0$, $V_\kappa = const$, и в этом случае получается κ конечных соотношений:

$$mg\sin\alpha_\kappa = T_{\kappa-1,\kappa} - T_{\kappa,\kappa+1} - W_\kappa(V_\kappa),\ (\kappa = 1,...,n), \quad (5)$$

которые содержат $n-1$ неизвестных $T_{\kappa-1,\kappa}$ и κ неизвестных V_κ.

Уравнение (5) допускает для V_κ решение вида:

$$V_1 = V_2 = ... = V_\kappa = V, \quad (6)$$

отвечающее движению всех масс с одинаковой скоростью V.

Уравнение (5) примет вид соотношения:

$$mg\sin\alpha_\kappa = T_{\kappa-1,\kappa} - T_{\kappa,\kappa+1} - W_\kappa(V). \quad (7)$$

Из соотношения (7) можно определить $n-1$ силу взаимодействия масс через связывающие их упругие элементы и величину средней скорости циркуляционного движения рабочей среды. При этом как $T_{\kappa-1,\kappa}$, так и V оказываются не зависящими от величин жесткостей упругих элементов C, выбрать конкретные значения которых представляется затруднительным.

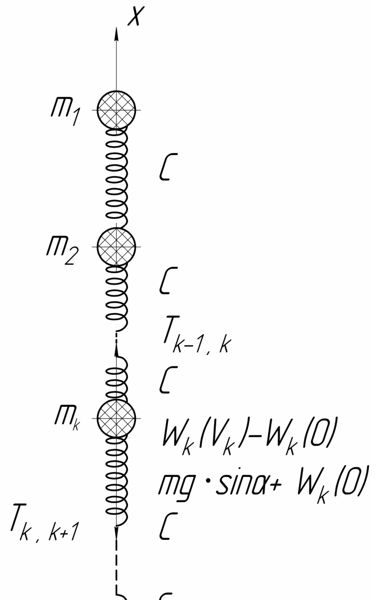


Рис. 3. Физический аналог модели движения рабочей среды

Существенное значение имеет вопрос устойчивости квазистационарного движения системы, отвечающего решению уравнения (7). Этот вопрос должен решаться с учетом уравнений (3) и (4). При справедливости сделанного допущения и достаточно медленном изменении зависящих от времени коэффициентов этих уравнений достаточные условия устойчивости, согласно теореме Томсона и Тета [12], будут определены неравенством:

$$\left.\frac{\partial W_\kappa}{\partial V_\kappa}\right|_{V_\kappa = V} \geq 0\,,\ \left(\kappa = 1,\dots,n\right). \qquad (8)$$

Выявленные условия гарантируют полную или частичную диссипативность сил W_κ, присоединяемых к устойчивой консервативной системе вблизи решения $W_\kappa = V$.

Уравнения (3) и (4) можно трактовать как уравнения движения цепочки одинаковых масс m, связанных пружинами жесткости C и падающих в сопротивляющейся среде под действием квазипостоянных сил тяжести $mg\sin\alpha_\kappa + W_\kappa\left(0\right)$ и сил вязкого сопротивления $W_\kappa\left(V_\kappa\right) - W_\kappa\left(0\right)$ (рис. 3). Установившимся квазистационарным движением такой цепочки будет падение с квазипостоянной и одинаковой для всех масс скоростью V, которая определяется вместе с натяжениями пружин $T_{\kappa-1,\kappa}$ из уравнения (7).

Литература

1. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / [Карташов И. Н., Шаинский М. Е., Власов В. А. и др.] – К.: Высшая школа, 1975. – 188 с.

2. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М: Наука, 1964. – 412 с.

3. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательство центр ДГТУ, 2008. – 694 с.

4. Гончаревич И.Ф. Динамика горных машин с упругими связями / И.Ф. Гончаревич, А.В. Докукин. – М: Наука, 1975. – 212 с.

5. Левенгарц В.Л. Исследование динамики и совершенствование устройств для вибрационной обработки деталей: дис. … кандидата техн. наук: 05.02.18 / Левенгарц Виктор Львович. – М., 1980. – 186 с.

6. Мицык В.Я. Особенности механики метода отделочно-зачистной и упрочняющей обработки в колеблющихся резервуарах и эффективность оборудования для его реализации / В.Я. Мицык // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. - 2007. – Ч. 2, № 1 (42). – С. 52 - 57.

7. Медяник В.А. Исследование эффективности процесса виброобработки в зависимости от некоторых технологических параметров виброустановок: дис. … кандидата техн. наук: 05.02.08 / Медяник Виктор Александрович. – М., 1988. – 189 с.

8. Мицык В.Я. Технологические возможности и конструктивные особенности виброустановки со встречнодвижущимися потоками рабочей среды / В.Я. Мицык // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. - 2006. - № 19. – С. 146–152.

9. Мицык В.Я. Интенсификация обработки деталей в вибрирующих резервуарах встречнодвижущимися потоками рабочей среды: дис. … кандидата техн. наук: 05.02.08 / Мицык Владимир Яковлевич. – М., 1988. – 232 с.

10. Лавендел Э.Э. Система гипотез в технических расчетах по вибрационному перемещению / Э.Э. Лавендел // Вопросы динамики и прочности / Э.Э. Лавендел – Рига, 1966. - № 21. – С. 5 - 10.

11. Блехман И.И. Метод прямого разделения движений в задачах о действии вибрации на нелинейные механические системы / И.И. Блехман // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. - 1976. - № 6. – С. 13 – 27.

12. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения /Давид Рахмильевич Меркин - М.: Наука, 1976. – 320 с.