

УДК 621.9.06:628.5

Закономерности динамического взаимодействия рабочей среды со стенками галтовочного барабана¹

А. В. Ющенко

(Институт водного транспорта им. Г. Я. Седова),

А. Н. Чукарин

(Донской государственный технический университет)

Галтовочные барабаны широко применяются в различных отраслях машиностроения. Основным недостатком таких технологических машин является высокая интенсивность звукового излучения. В современных барабанах применяются малозумные приводы. Фактически превышения санитарных норм шума создаётся звуковым излучением корпуса барабана при воздействии на него рабочей среды. В статье приводятся результаты исследований закономерностей динамического взаимодействия среды со стенками барабана. В настоящей работе использован R-ε-метод учёта турбулентного движения сред. Согласно этому подходу, при описании движений гранулированной среды используется система уравнений Навье — Стокса и уравнение неразрывности. Геометрия конечноэлементной модели отвечала форме и размерам галтовочного барабана CF1×18B. Осевая симметрия барабана позволила построить одну половину его сечения вертикальной плоскостью, проходившей через геометрический центр. Для рассчитанных скоростей обтекания и нормальных компонент скоростей на границах, давлений на стенки, определяются потоки энергии среды, действующей на стенки барабана. Эти данные позволяют теоретически рассчитать акустические характеристики галтовочных барабанов.

Ключевые слова: динамическое взаимодействие, рабочая среда, галтовочные барабаны.

Введение. Галтовочные барабаны широко применяются в машиностроении на операциях очистки, удаления слоя, снятия заусенцев, скругления острых кромок. Простейшая конструкция барабана представляет собой вращающийся резервуар цилиндрической или несколько сужающейся к горловине формы, заполняемый абразивной средой или стальными звёздочками (в зависимости от требуемой операции и заданного качества поверхности обрабатываемых деталей). Барабан вращается вокруг своей оси, увлекая обрабатывающую среду и детали небольшого размера. Наклоняя ось вращения, можно менять траекторию движения среды, тем самым создавая более интенсивное перемешивание и предотвращая образование застойных зон. По окончании обработки, которая длится от получаса до нескольких часов, вращение барабана останавливают, наклоняют ось и выгружают детали вместе со средой. Для сепарации могут применяться различные сита. Общий вид таких барабанов представлен на рис. 1.

Моделирование виброакустической динамики галтовочных барабанов. Общими недостатками подобных барабанов являются значительный уровень шума, недостаточно интенсивное перемешивание среды, необходимость отслеживания времени включения и остановки процесса. Для исключения перечисленных недостатков были разработаны современные конструкции барабанов, отличающиеся более высокой степенью автоматизации, способом приведения среды в движение и уменьшенным уровнем шума. Это было достигнуто благодаря подключению к электроприводу системы программирования режимов изменения скоростей вращения ведущего вала; отключения и подачи жидкости для очистки от шлама; облицовки внутренней поверхности барабана звукоизолирующим материалом, обладающим также высокими фрикционными свойствами. Кроме того, как показали исследования, наиболее интенсивное перемешивание среды происходит при вращении конического дна барабана и неподвижных цилиндрических стенках. Такая схема

¹ Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

обеспечивает движение среды по винтовой линии, «намотанной» на тор, который образует поверхность среды. Меняя скорость вращения дна, можно подбирать оптимальный режим работы, что необходимо при изменении размеров, формы частиц, удельного веса и характеристик внутреннего трения среды в целом. Примером такого барабана современной конструкции является барабан CF 1×18 В производства Германии, общий вид которого представлен на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид двух типов галтовочных барабанов устаревшей конструкции



Рис. 2. Галтовочный барабан CF 1×18 В. Слева — общий вид, справа — рабочая камера, заполненная обрабатываемой средой и деталями

Однако, несмотря на усовершенствования, особенно в части шумо- и виброзащиты, барабаны современной конструкции всё ещё являются весьма интенсивными источниками шума. Причём, если шумоизлучение привода сведено до минимума за счёт применения малошумящих двигателей, подшипниковых узлов и механизмов изменения частоты вращения, то движущаяся сре-

да, встречаясь со стенками барабана, создаёт значительный шум, т. к. технологический эффект обработки в барабане напрямую зависит от скорости частиц среды, которую стремятся повышать из соображений производительности.

Задачей настоящего этапа исследования было установление закономерностей динамического взаимодействия среды со стенками барабана, определение мощности, передаваемой стенкам при изменении режимов вращения, а также оценка спектра излучаемых звуковых частот. Такое исследование, имеющее своей целью получить конкретные количественные результаты, может быть выполнено только с использованием специальных численных методов моделирования, т. к. известные аналитические подходы позволяют получить качественные результаты только для простейших случаев движения дискретных сред.

Метод дискретных элементов, в котором моделируется движение каждой отдельной частицы среды, в данном случае также не подходит, т. к. известные методы и программные средства [1] успешно могут применены только для плоских движений сред, а движение среды в барабанах является существенно трёхмерным. Однако в последние годы, благодаря интенсивному развитию методов моделирования систем с распределёнными параметрами методом конечных элементов, появилась возможность решать задачи динамики гранулярных систем, для которых вводятся эффективные механические свойства (плотность, сжимаемость, вязкость), зависящие как от свойств самих гранулярных частиц, так и от режима движения [2—4].

В работах [5, 6] гранулярная среда рассматривается как вязкая жидкость, описываемая уравнением Навье — Стокса и уравнением неразрывности:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} - \mathbf{P}] + \mathbf{F}, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}$ обозначает вектор скорости; ρ — плотность среды; $\mathbf{P}_j = -\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)$ — тензор динамической вязкости, выражающийся через тензор скоростей деформаций; $\mathbf{F}$ — вектор массовых сил и p — давление.

Дополнительно к уравнениям (1) рассматривается уравнение для так называемой гранулярной температуры ϑ :

$$\rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \vartheta = -\mathbf{P} : \nabla \mathbf{u} - \nabla \cdot \hat{\mathbf{q}}^T - z^T, \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{q}}^T$ — диффузионный член; z^T — диссипативный член, описывающий снижение подвижности гранулярной средой при повышении давления.

Решение уравнения (2) даёт зависимость коэффициента динамической вязкости среды от гранулярной температуры $\eta = f(\vartheta)$.

Как следует из приведённых уравнений, метод непосредственно не учитывает межгранулярной жидкости, среду считает несжимаемой, тензор вязких напряжений — симметричным и пренебрегает эффектами памяти. Однако эти ограничения не являются критичными для описания медленных движений среды. Его главный недостаток — неучтённая турбулентность, которая возникает при быстрых движениях в галтовочном барабане.

Поэтому в настоящей работе использован так называемый $k - \varepsilon$ -метод учёта турбулентности, развитый в работе [7] применительно к задачам турбулентного движения сред, механические свойства которых могут быть выражены некоторыми эффективными величинами. Согласно этому подходу, при описании движений гранулированной среды используется система уравнений, содержащая уравнение Навье — Стокса и уравнение неразрывности:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (3)$$

Конструкция галтовочного барабана обладает осевой симметрией, но так как окружные скорости среды не равны нулю, все три компоненты скорости будут отличны от нуля. В состоянии стационарного осесимметричного течения среды уравнения (3) приводятся к виду:

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial r} &= \eta \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + F_r, \\ \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \eta \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{v}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + F_\varphi, \\ \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} &= \eta \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + F_z, \end{aligned} \quad (4)$$

где u — радиальная составляющая скорости; v — окружная; w — осевая; F_r, F_φ, F_z — компоненты массовой силы.

Согласно $k-\varepsilon$ -модели [7] учёт турбулентности в стационарном случае производится путём модификации (3):

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nabla \cdot \left[-\rho \mathbf{I} + (\eta + \eta_T) \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k &= \nabla \cdot \left[(\eta + \eta_T / \sigma_k) \nabla k \right] + \frac{\eta_T P(\mathbf{u})}{k} - \rho \varepsilon, \\ \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon &= \nabla \cdot \left[(\eta + \eta_T / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \eta_T P(\mathbf{u})}{k} - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (5)$$

где функция $P(\mathbf{u})$ выражается через градиент поля скоростей среды

$$P(\mathbf{u}) = \frac{\nabla \mathbf{u}}{\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T};$$

добавка к вязкости среды, обусловленная турбулентным характером движения

$$\eta_T = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon};$$

$(\eta + \eta_T / \sigma_k)$ и $(\eta + \eta_T / \sigma_\varepsilon)$ — эффективные коэффициенты турбулентной диффузии; k — кинетическая энергия; ε — скорость диссипации энергии; C_ε — коэффициент искусственной диффузии, используемый при численном решении для обеспечения устойчивой сходимости.

Геометрия конечноэлементной модели отвечала форме и размерам галтовочного барабана CF 1×18 В. Осевая симметрия барабана позволила построить одну половину его сечения вертикальной плоскостью, проходившей через геометрический центр. Граничные условия выбирались исходя из конструкции и кинематики движущихся частей (рис. 3).

Выражения для граничных условий:

- граница 1 (ось вращения): $r = 0$;
- границы 2, 6, 4 (вращающееся дно):

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{w^1} \left[(\eta + \eta_T) \right] (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \mathbf{n}, \\ \mathbf{n} \cdot \nabla k &= 0, \\ \varepsilon &= \frac{\rho C_\mu k^2}{k \delta_w + \eta}, \end{aligned} \quad (6)$$

где окружная скорость $w_w = \omega r$, относительная толщина турбулентного слоя у стенки $\delta_w = 100$ [11];

- на неподвижных границах 5, 7 условия аналогичны, за исключением того, что скорость $w_w = 0$;

- свободная граница 3

$$\begin{aligned} \left[-p\mathbf{I} + (\eta + \eta_T) \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] \mathbf{n} &= -p_0 \mathbf{n}, \\ \mathbf{n} \cdot \nabla k &= 0, \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \varepsilon &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mathbf{n}$ — вектор нормали к границе; p_0 — внешнее давление на поверхность среды.

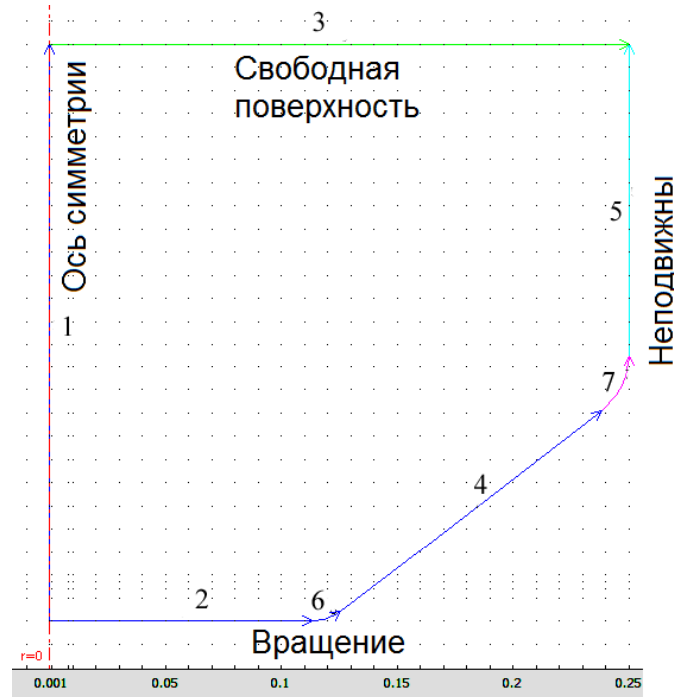


Рис. 3. Геометрия осесимметричной конечноэлементной модели галтовочного барабана

Конечноэлементное разбиение области моделирования было выполнено, исходя из нижеперечисленных требований. Так как характер завихренного движения среды может быть достаточно сложным, а законы изменения скоростей и давлений на поверхностях (границах области) весьма быстро изменяющимися, шаг сетки должен быть значительно меньше, чем характерный размер турбулентных вихрей. Поэтому вблизи границ шаг сетки был не более 1 мм, увеличиваясь в середине области (рис. 4). Количество элементов составляло 13700.

Так как основной интерес представляли свойства моделируемой системы в режиме стационарного вращения, решение задачи отыскивалось при постоянных числах оборотов дна: 120, 180, 240 и 300 об/мин. Решение задачи выполнялось в системе конечноэлементного моделирования Comsol Multiphysics, с использованием базы данных системы о параметрах гранулированной среды, аналогичной используемой в галтовочных барабанах (рис. 2). Характерный размер частиц составлял 1 см. Плотность среды в свободном насыпном состоянии 1350 кг/м^3 , в состоянии движения — $1200 \pm 50 \text{ кг/м}^3$.

При решении поставленной задачи использовался сегрегированный решатель, отдельно вычисляющий две группы параметров: первая группа — радиальная, осевая и окружная скорости u, v, w и давление p , вторая группа — параметры турбулентности k, ε .

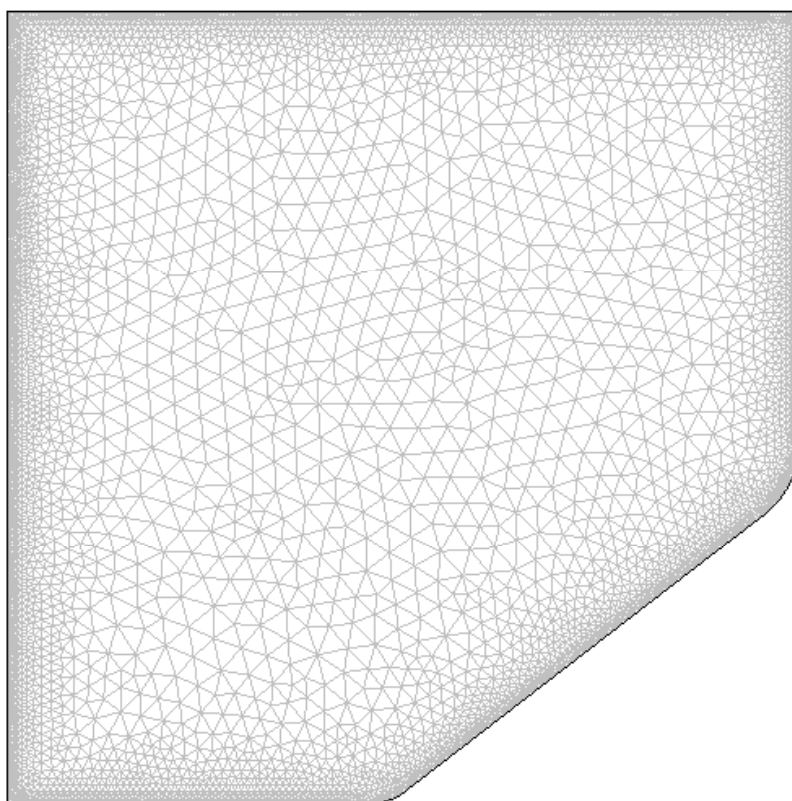


Рис. 4. Конечноэлементное разбиение поперечного сечения модели барабана

Примеры полей скоростей среды (линии тока) и давлений (цветовая палитра) представлены на рис. 6. Хорошо видно, как по мере наращивания скорости вращения область повышенного давления сдвигается от оси вращения в сторону боковых стенок.

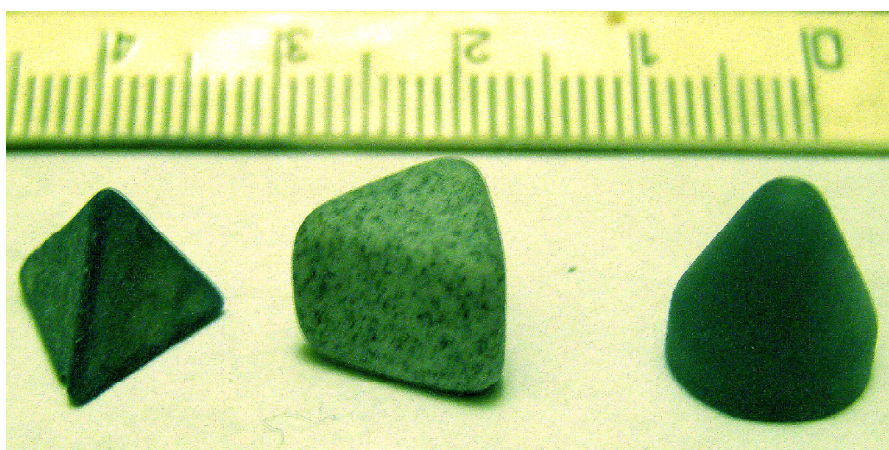


Рис. 5. Примеры абразивных сред, используемых в галтовочных барабанах: пирамиды, призмы и конусы

Для рассчитанных значений скоростей вращения дна барабана построены зависимости скоростей среды обтекания и нормальных компонент скоростей на границах от давлений на стенках (рис. 6), которые затем использованы для определения потока энергии среды, действующего на стенки барабана, и возбуждаемых звуковых частот.

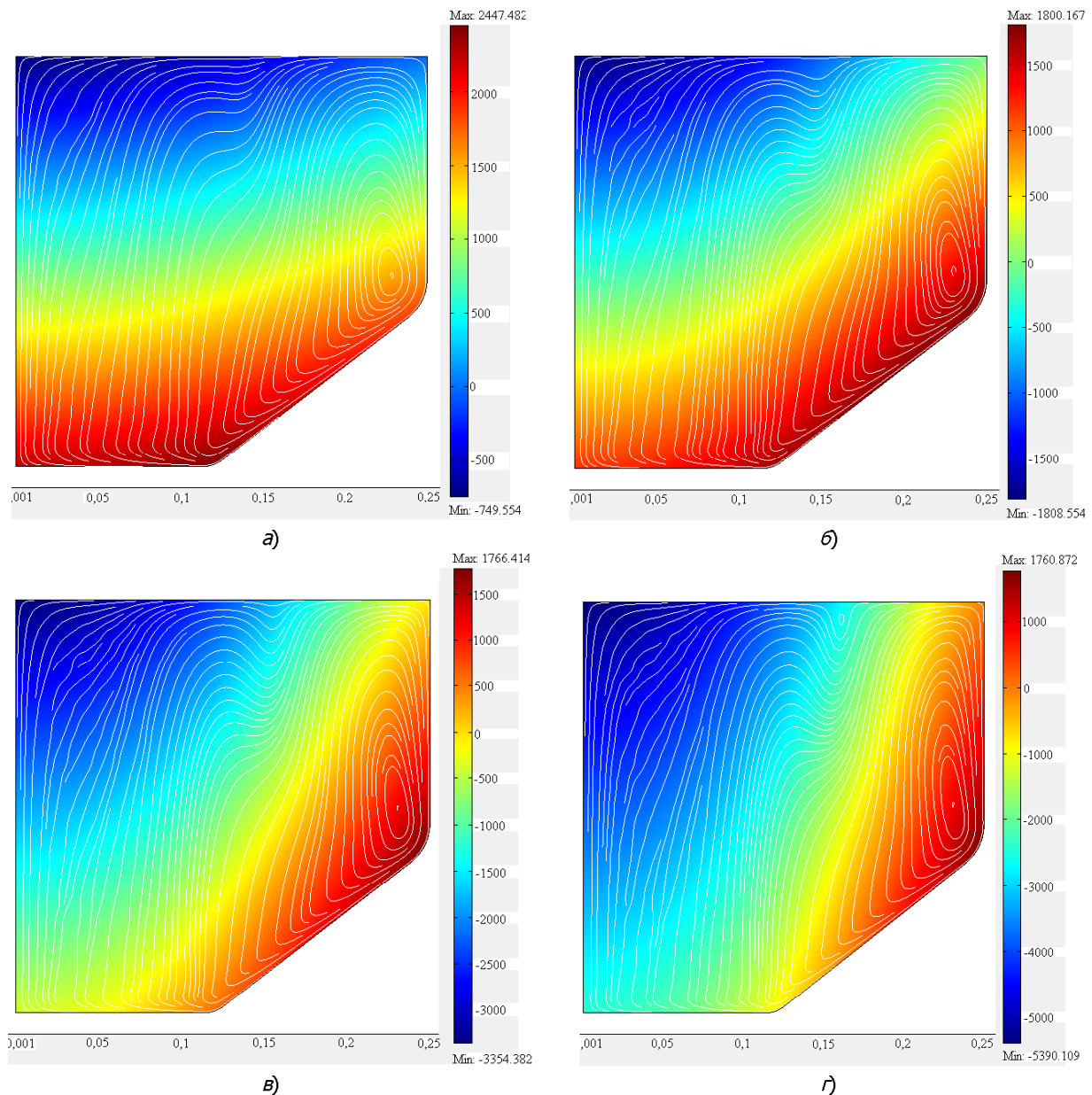


Рис. 6. Поля давлений и скоростей в среде при работе галтовочного барабана при скоростях вращения дна: а — 120 об/мин, б — 180 об/мин, в — 240 об/мин и г — 300 об/мин

Выводы.

1. На примере конструкции современного галтовочного барабана, предназначенного для отделочно-зачистной обработки деталей в среде абразивных гранул, построена конечноэлементная модель с осесимметричной геометрией, описываемая уравнениями эквивалентной сжимаемой вязкой среды, и учитывающая турбулентный характер её движения.

2. Для четырёх реально используемых в технологии обработки режимов вращения барабана выполнен стационарный анализ динамики вращения массы загрузки, позволивший восстановить сложный характер движения среды, наблюдаемый в эксперименте, и на его основе построить распределения динамических давлений, скоростей нормального взаимодействия среды со стенками контейнера и передаваемой мощности.

3. На основе гипотезы о характере движения гранулярных частиц с сильно выраженной гранностью выполнена оценка спектра частот, возбуждаемых движущейся гранулированной сре-

дой при её взаимодействии со стенками. Установлено увеличение интенсивности воздействия среды с ростом числа оборотов барабана и сдвиг акустического спектра в область более высоких частот.

Библиографический список

1. Шевцов, С. Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в технологических машинах / С. Н. Шевцов. — Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2001. — 194 с.
2. Eckart, W. Continuum description of granular materials, Part II / W. Eckart, S. Faria, K. Hutter, N. Kirchner, S. Pudasiani, Y. Wang. — Turin : Polytechnic Institute, 2002. — 221 p.
3. Nishimura, K. Contribution of viscous forces to avalanche dynamics / K. Nishimura, N. Maeno. — International Glaciological Society: Annals of Glaciology, 1989. — No. 13 — pp. 202–206.
4. Macosko, C. Rheology: principles, measurements and application / C. Macosko. — New York : Wiley-VCH, 1994. — 568 p.
5. Zugliano, A. Numerical Simulation of Granular Solids' Rheology : Comparison with Experimental Results / A. Zugliano, R. Artoni, A. Santomaso, A. Primavera, M. Pavličević. — Hannover : Proc. of the COMSOL Conference, 2008. — 6 p.
6. Zugliano, A. Numerical Simulation of Granular Solids' Behaviour: Interaction with Gas / A. Zugliano, R. Artoni, A. Santomaso, A. Primavera. — Milan : Proc. of the COMSOL Conference, 2009. — 6 p.
7. Gresho, P. M., Sani, R. L. Incompressible Flow and the Finite Element Method / P. M. Gresho, R. L. Sani. — John Wiley and Sons Ltd. — 1998. — Vol. 2 — 469 p.

Материал поступил в редакцию 12.12.2012.

References

1. Shevtsov, S. N. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki granulirovanny'x sred v tekhnologicheskix mashinax. [Computer simulation of granular media dynamics in production machines.] Rostov-on-Don : SKNCz VSh, 2001, 194 p. (in Russian).
2. Eckart, W., Faria, S., Hutter, K., Kirchner, N., Pudasiani, S., Wang, Y. Continuum description of granular materials, Part II. Turin : Polytechnic Institute, 2002, 221 p.
3. Nishimura, K., Maeno, N. Contribution of viscous forces to avalanche dynamics. International Glaciological Society: Annals of Glaciology, 1989, no. 13, pp. 202–206.
4. Macosko, C. Rheology: principles, measurements and application. New York : Wiley-VCH, 1994, 568 p.
5. Zugliano, A., Artoni, N., Santomaso, A., Primavera, A., Pavličević, M. Numerical Simulation of Granular Solids' Rheology: Comparison with Experimental Results. Hannover : Proc. of the COMSOL Conference, 2008, 6 p.
6. Zugliano, A., Artoni, N., Santomaso, A., Primavera, A. Numerical Simulation of Granular Solids' Behaviour: Interaction with Gas. Milan : Proc. of the COMSOL Conference, 2009, 6 p.
7. Gresho, P. M., Sani, R. L. Incompressible Flow and the Finite Element Method. John Wiley and Sons Ltd., 1998, vol. 2, 469 p.

DYNAMIC INTERACTION RULES OF OPERATING ENVIRONMENT AND TUMBLING DRUM BARRELS¹

A. V. Yushchenko

(Sedov Water Transport Institute),

A. N. Chukarin

(Don State Technical University)

Tumbling drums are widely applied in various mechanical engineering branches. The basic deficiency of such technological machines is high intensity of the sound radiation. In modern drums, quiet drives are applied. In practice, the excess of the sanitary noise code is created by the sound radiation of the drum body under the operating environment. The investigation of the dynamic interaction behavior of the environment and drum barrels is resulted. $R - \varepsilon$ method of the media turbulence records is used in the present work. According to this approach, Navier-Stokes system of the equations and the continuity equation are used in describing the granular medium motion. The finite-element model geometry meets the form and the sizes of the CF1×18B tumbling drum. The drum axial symmetry has allowed constructing one half of its sectional elevation passing through the geometric centre. Medium energy flows affecting the drum barrels are defined for the calculated ambient velocities and normal velocity components on the boundaries, wall pressure. This data allows calculating theoretically the acoustic characteristics of the tumbling drums.

Keywords: dynamic interaction, run-time environment, tumbling drums.

¹ The research is done within the frame of the independent R&D.