

DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.51-56

УДК 621.3

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ ЖИДКОСТЬ- ТВЕРДОЕ ТЕЛО В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ АППАРАТЕ С БАРБОТАЖЕМ

A Computer Model of the Dynamics of a Heterogeneous Liquid-Solid Medium in a Technological Apparatus with Bubbling



О. Ю. Олейник, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий и метрологии, e-mail: oleinik_o@ukr.net

Ю. К. Тараненко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: taranen@rambler.ru

Украинский государственный химико-технологический университет, г. Днепр

O. Yu. Oliynyk, candidate of technical sciences, associate professor of the department of computer-integrated technologies and metrology, e-mail: oleinik_o@ukr.net

Yu. K. Taranenko, doctor of technical sciences, professor, head of the department, e-mail: taranen@rambler.ru

Ukrainian state chemical-technology university, Dnipro

Статья посвящена разработке компьютерной модели динамики гетерогенной среды жидкость-твердое тело в технологическом аппарате с барботажем. В гетерогенной среде барботажного аппарата известные методы контроля среды являются трудно реализуемыми и практически непригодны для контроля в потоке среды, поэтому необходимы новые подходы к реализации программно-аппаратного комплекса информационных систем.

Существующие математические не учитывают изменения концентрации жидкости вследствие образования суспензий твердых включений при барботаже жидкости дымовыми газами и динамики поведения газовых пузырьков в вибрационном поле аппарата. Вибрационные средства измерений могли бы решить поставленную задачу путем учета изменений плотности и вязкости составляющих среды.

В основе разработанной математической модели гетерогенной среды жидкость-твердое тело, обеспечивающей достоверность информации в информационных системах, — модель виброчастотного метода контроля концентрации твердой фракции суспензий, основанная на использовании особенностей поведения твердой фазы суспензии в вибрационном поле.

На основании уравнения движения частицы в вибрационном поле для случая сферической формы частицы, которая находится в свободных условиях при ламинарном режиме движения, с учетом зависимости плотности суспензии от плотности твердой фазы и жидкости, вязкости суспензии от вязкости жидкости и плотности твердой фазы, получено новое дифференциальное уравнение.

Полученное уравнение динамики гетерогенной среды жидкость-твердое тело в технологическом аппарате с барботажем решено про-

граммно в среде Python, с использованием библиотеки *супру*, с применением комплексного сопряжения и упрощения.

Получены соотношения для контроля концентрации суспензии, образуемой в технологическом аппарате после барботирования дымовых газов через слой жидкости. Приведенные результаты программной реализации модели подтверждают, что с увеличением частоты вибрационного поля уменьшается относительная амплитуда твердой фазы, а следовательно, и её эффективная масса, участвующая в колебаниях среды.

Статья посвящена разработке компьютерной модели динамики гетерогенного средовища рідина-тверде тіло в технологічному апараті з барботажем. У гетерогенному середовищі барботажного апарата відомі методи контролю середовища важко реалізувати, і вони практично непридатні для контролю в потоці середовища; тому необхідні нові підходи до реалізації програмно-апаратного комплексу інформаційних систем.

Наявні математичні не враховують зміни концентрації рідини внаслідок утворення суспензій твердих включень за барботажу рідини димовими газами і динаміки поведінки газових бульбашок у вібраційному полі апарата. Вибраційні засоби вимірювань могли б вирішити поставлену задачу шляхом обліку змін щільності й в'язкості складових середовища.

В основі розробленої математичної моделі гетерогенного середовища рідина-тверде тіло, що забезпечує достовірність інформації в інформаційних системах, — модель виброчастотного методу контролю концентрації твердої фракції суспензій, заснована на використанні особливостей поведінки твердої фазы суспензії у вібраційному полі.



О. Ю. Олейник



Ю. К. Тараненко

На основі рівняння руху частинки у вібраційному полі для випадку сферичної форми частинки, яка перебуває за вільних умов за ламінарного режиму руху, з урахуванням залежності густини суспензії від щільності твердої фази і рідини, в'язкості суспензії від в'язкості рідини і густини твердої фази, отримано нове диференціальне рівняння.

Отримане рівняння динаміки гетерогенного середовища рідина-тверде тіло в технологічному апараті з барботажем розв'язано програмно у середовищі Python з використанням бібліотеки *sympy*, із застосуванням комплексного пари та спрощення.

Отримано співвідношення для контролю концентрації суспензії, утвореної в технологічному апараті після барботування димових газів через шар рідини. Наведені результати програмної реалізації моделі підтверджують, що зі збільшенням частоти вібраційного поля, зменшується відносна амплітуда твердої фази, а отже, її ефективна маса бере участь у коливаннях середовища.

The article is devoted to the development of a computer model of the dynamics of a heterogeneous liquid-solid medium in a technological apparatus with bubbling. In a heterogeneous bubbler medium, the known methods of environmental control are difficult to implement and practically unsuitable for control in the flow of the medium; therefore, new approaches to the implementation of the software and hardware complex of information systems are necessary.

Existing mathematical not take into account the change in the concentration of the liquid due to the formation of solid suspensions included in the bubbling of the liquid by flue gases and the dyna-

tics of the behavior of gas bubbles in the vibration field of the apparatus. Vibration measuring instruments could solve the problem by taking into account changes in the density and viscosity of the components of the medium.

The developed mathematical model of a heterogeneous liquid-solid medium, which ensures the accuracy of information in information systems, is based on the model of vibration frequency methods for monitoring the concentration of the solid fraction of suspensions, based on the use of the behavior of the solid phase of the suspension in a vibration field.

Based on the equation of motion of a particle in a vibrational field for the case of a spherical shape of the particle, which is in free conditions under a laminar regime of motion, taking into account the dependence of the density of the suspension on the density of the solid phase and liquid, the viscosity of the suspension on the viscosity of the liquid and density of the solid phase, a new differential equation is obtained.

The obtained equation of dynamics of a heterogeneous liquid-solid medium in a technological apparatus with bubbling is solved by a software solution in the Python environment, with the introduction of the *sympy* library using complex Conjugation and simplification.

Relations are obtained for controlling the concentration of the suspension formed in the technological apparatus after bubbling flue gases through a liquid layer. The presented results of the software implementation of the model confirm that with an increase in the frequency of the vibrational field, the relative amplitude of the solid phase decreases, and therefore its effective mass participating in the vibrations of the medium.

Ключевые слова: компьютерная модель динамики, вибросчастотный метод, концентрации твёрдой фракции, суспензия, Python.

Ключові слова: комп'ютерна модель динаміки, вібросчастотний метод, концентрації твердої фракції, суспензія, Python.

Keywords: computer model of dynamics, vibration-frequency method, concentration of solid fraction, suspension, Python.

Сложность внедрения информационных технологий в производство, прежде всего, связана с трудностями разработки программно-технических средств автоматизированных систем сложных технологических объектов. К таким объектам можно, бесспорно, отнести и теплообменные аппараты барботажного типа. Наличие гетерогенных сред в таких аппаратах требует особых подходов к реализации программно-аппаратного комплекса информационных систем.

Задача усложняется тем, что в гетерогенной среде барботажного аппарата известные методы контроля среды (оптический, ультразвуковой, счёта воздушных пузырей, радиационный) являются трудно реализуемыми и практически непригодны для контроля в потоке среды. Исключение могли бы составить вибрационные средства измерений, однако, без учёта изменений плотности и вязкости составляющих среды, вибрационный метод не может обеспечить достоверности информации; и поэтому такие информационные системы не получили широкого применения на производстве, а литературные данные немногочисленны и имеют экспериментальный характер.

Дымовые газы представляют собой продукты сгорания топлива, возникающие в результате сжигания газов любого типа в камере горения. Для повышения эффективности производства большинство предприятий применяет дымовые газы для рекупе-

рации тепловой энергии. В ряде технологических аппаратов рекуперация сводится к барботажу дымовых газов через жидкость. В работах, посвященных исследованию таких процессов и сред, авторы не учитывают изменения концентрации жидкости за счет образования суспензий твердых включений при барботаже жидкости дымовыми газами. Не учитывается и динамика поведения газовых пузырьков в вибрационном поле аппарата.

Основой математической модели гетерогенной среды жидкость-твердое тело, обеспечивающей достоверность информации в ИС, является модель вибросчастотного метода контроля концентрации твёрдой фракции суспензий, использующая особенности поведения твердой фазы суспензии в вибрационном поле [1].

Известно, что в вибрационном поле резонатора дисперсионная фаза (жидкость) ведет себя как твердое тело, жестко связанное с резонатором, а дисперсная фаза (твердые частицы), вследствие инерции и действия сил трения, движутся со сдвигом по фазе и имеют амплитуду колебаний, отличающуюся от амплитуды колебаний жидкости [2].

В условиях, когда среда в аппарате представляет собой гетерогенную систему типа жидкость-твердое тело или жидкость-газ, реакция в виде изменения частоты или амплитуды колебаний среды датчика не несет достоверной информации о составе и свойствах контролируемого вещества [3].

Немногочисленные публикации на тему реализации вибрационного метода контроля, в информационных системах сложных объектов в производственных условиях, посвящены применимости к гомогенным средам при решении измерительных задач контроля плотности или вязкости [4, 5]. В работе [5] представлена общая информация и анализ математических моделей устройств виброзащиты, реализуемых на основе магнитореологической суспензии. Отмечено, что применимость той или иной реологической модели заключается в замене истинной реологической зависимости некоторым уравнением, которое достаточно точно отображает экспериментальную кривую в выбранном диапазоне скоростей сдвига.

Таким образом, внедрение информационных систем с использованием виброчастотных средств измерения ограничено в связи с отсутствием научных основ методологии виброчастотного контроля в условиях гетерогенной среды. Решение этой проблемы является актуальной научно-прикладной задачей и позволит расширить внедрение информационных технологий в производство.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели динамики гетерогенной среды жидкость-твердое тело в технологическом аппарате с барботажем, на основе усовершенствования известной модели вибрационно-частотного метода контроля путем учёта плотности и вязкости гетерогенной среды типа жидкость — твердое тело, с теоретическим анализом среды для условий естественного возникновения вибрационного поля при барботаже дымовых газов через жидкость для рекуперации тепловой энергии.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В УСЛОВИЯХ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ: ЖИДКОСТЬ — ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ

Воспользовавшись предположением, приведенным в работе [6], согласно которому «эффективная масса» m_{ET} дисперсной фазы суспензии в вибрационном поле пропорциональна отношению амплитуд колебаний дисперсной и дисперсионной фаз, получим:

$$m_{ET} = m_T \cdot \theta, \quad (1)$$

где m_T — масса твердой фазы.

Соотношение для θ можно получить из уравнения движения частицы в вибрационном поле [7, 8] для случая сферической формы частицы, которая находится в свободных условиях при ламинарном режиме движения:

$$\left. \begin{aligned} m'_T \cdot \frac{dv_T}{d\tau} &= m'_p \cdot \frac{dv_{ж}}{d\tau} + \frac{m'_p}{2} \cdot \left(\frac{dv_{ж}}{d\tau} - \frac{dv_T}{d\tau} \right) + \\ &+ \frac{9}{4} \cdot m'_p \cdot \omega \cdot \beta \cdot (v_{ж} - v_T) + \\ &+ 3 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \mu_{ж} \cdot (v_{ж} - v_T) + \frac{9}{4} \cdot m'_{ж} \cdot \beta \cdot \left(\frac{dv_{ж}}{d\tau} - \frac{dv_T}{d\tau} \right), \quad (2) \\ \beta &= \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_{ж}}{\omega \cdot \rho_{ж}}} \end{aligned} \right\}$$

где $v_{ж} = X_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot \tau)$ — скорость колебательно-го движения жидкости; $v_T = \theta \cdot X_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot \tau - \vartheta)$ — скорость колебательно-го движения частицы; ϑ — угол сдвига фаз колебаний частицы относительно жидкости; $X_{\max} = 1$ — амплитуда колебаний жидкости; ω — круговая частота колебаний вибрационного поля; $m'_T = \pi \cdot (\delta^3 / 6) \cdot \rho_T$ — масса твердой частицы; $m'_{ж} = \pi \cdot (\delta^3 / 6) \cdot \rho_{ж}$ — масса жидкости в объеме твердой частицы; δ — радиус твердой частицы; $\mu_{ж}$ — динамическая вязкость жидкости; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; τ — координата времени.

В реальных стеснённых условиях движения твердых частиц средняя скорость движения жидкости увеличивается вследствие вытеснения жидкости твердыми частицами [9] до значения:

$$v_{ж} = v''_{ж} + (v''_{ж} - v_T) \cdot \frac{C}{\rho_c - C}, \quad (3)$$

где $v''_{ж}$ — скорость колебательно-го движения жидкости без твердых частиц; C — концентрация твердой фазы в суспензии; ρ_c — плотность суспензии.

Для реализации виброчастотного метода контроля узкой фракции твердой фазы коллективом с автором статьи было предложено, для повышения достоверности контроля, учесть зависимость плотности суспензии от плотности твердой фазы и жидкости [10], а также вязкости суспензии μ_c от вязкости жидкости и плотности твердой фазы [11] согласно соотношениям:

$$\rho_c = \rho_{ж} + ((\rho_T - \rho_{ж}) / \rho_T) \cdot C, \quad (4)$$

$$\mu_c = \mu_{ж} \cdot (1 - C / \rho_T)^{-2,8}. \quad (5)$$

Подставляя (3), (4), (5) в дифференциальное уравнение (2), с учётом соотношения $\beta = (2/\delta) \cdot \sqrt{(2 \cdot \mu_c) / (\omega \cdot \rho_{ж})}$, получим новое дифференциальное уравнение:

$$\left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + \frac{1}{2} + \frac{9}{4} \cdot \beta \right) \cdot \frac{dv_T}{d\tau} + \frac{9}{4} \cdot \omega \cdot \beta \cdot (1 + \beta) \cdot v_T = \left(\frac{3}{2} + \frac{4}{9} \cdot \beta \right) \cdot \frac{dv_{ж}}{d\tau} + \frac{9}{4} \cdot \omega \cdot \beta \cdot (1 + \beta) \cdot v_{ж}. \quad (6)$$

Получить аналитическое решение уравнения (6) возможно только с использованием преобразования Лапласа. Для этого разделим все члены уравнения

на $(9/4) \cdot \omega \cdot \beta \cdot (1 + \beta)$ и введём следующие обозначения:

$$T_1 = \frac{\frac{4}{9} \cdot \left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + 0,5 \right) + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right),$$

$$T_2 = \frac{\frac{2}{3} + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right) \quad (7)$$

С учётом введенных обозначений (7) дифференциальное уравнение (6) в операторной форме переписывается в виде:

$$T_1 \cdot p \cdot v_T + v_T = T_2 \cdot p \cdot v_{ж} + v_{ж} \quad (8)$$

Решая (8) относительно отношения $v_T / v_{ж}$, получим:

$$\frac{v_T}{v_{ж}} = \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p + 1} \quad (9)$$

Для решения (9) в аналитической форме после подстановки $p = i \cdot \omega$ нужно определить модуль и аргумент от этого комплексного соотношения. Программное решение получено в среде Python, с использованием библиотеки *sympy* с применением комплексного сопряжения и упрощения.

Получаем следующие решения в аналитической форме:

$$\left| \frac{v_T}{v_{ж}} \right| = \frac{\sqrt{T_2^2 \cdot w^2 + 1}}{\sqrt{T_1^2 \cdot w^2 + 1}},$$

$$\vartheta = a \operatorname{tang} \frac{w \cdot (T_1 - T_2)}{(T_1 \cdot T_2 \cdot w^2 + 1)}$$

Полученные решения в аналитической форме переписываем согласно (7):

$$\theta = \frac{\left[\frac{\frac{2}{3} + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{\frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right) \right]^2 + 1}{\left[\frac{\frac{4}{9} \cdot \left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + 0,5 \right) + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}}{\frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_c}{\pi \cdot f \cdot \rho_{ж}}} \right) \right]^2 + 1} \quad (8)$$

$$\vartheta = \operatorname{arctang} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (T_1 - T_2)}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot T_1 \cdot T_2 + 1} \right) \quad (9)$$

Результаты, полученные в других публикациях, не противоречат результатам, полученным авторами данной статьи; например, в работе [11] получено соотношение для θ , которое не учитывает попра-

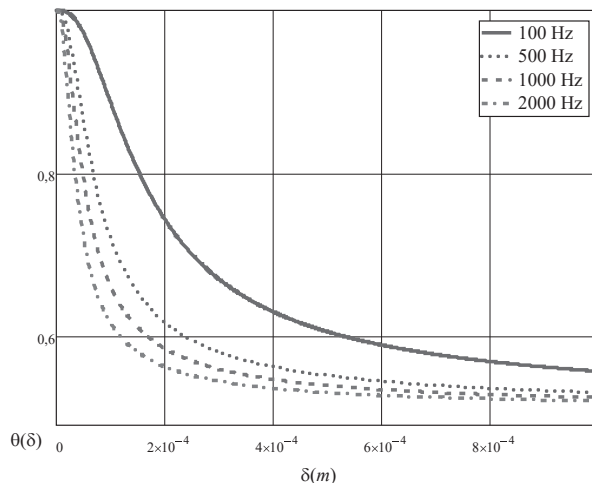


Рис. 1. Зависимость относительной амплитуды твердой фазы от частоты вибрационного поля и радиуса твёрдых частиц при концентрации водной суспензии известняка 100 кг/м³

Fig. 1. The dependence of the relative amplitude of the solid phase on the frequency of the vibration field and the radius of the solid particles at a concentration of an aqueous suspension of limestone of 100 kg/m³

вок (4), (5), повышающих достоверность контроля в среднем на 20 %.

Полученные соотношения (8), (9) можно использовать для контроля концентрации суспензии, образуемой в технологическом аппарате после барботирования дымовых газов через слой жидкости. Главной задачей контроля в этом случае является контроль концентрации твердой фракции при заданной концентрации водной суспензии. Приведенные

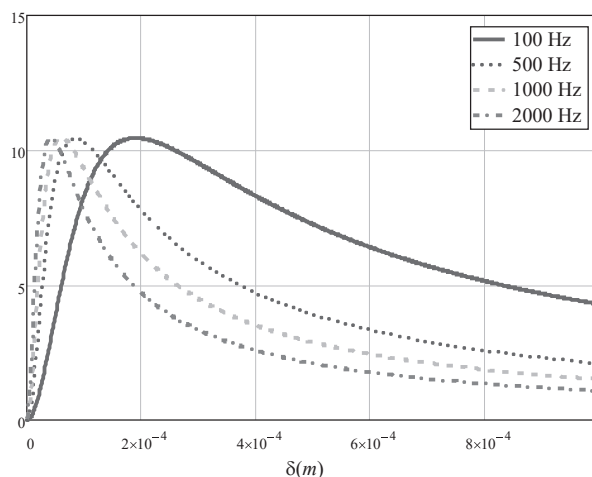


Рис. 2. Зависимость фазового сдвига твердых частиц по отношению к жидкости от частоты вибрационного поля и радиуса твёрдых частиц при концентрации водной суспензии известняка 100 кг/м³

Fig. 2. The dependence of the phase shift of solid particles with respect to liquid on the frequency of the vibration field and the radius of the solid particles at a concentration of an aqueous suspension of limestone of 100 kg/m³

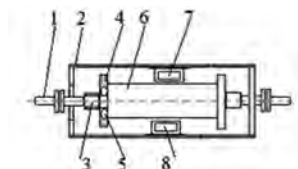


Рис. 3. Автоколебательный режим для автоматического изменения частоты вибрационного поля при помощи цилиндрического резонатора: а — технологический трубопровод; б — немагнитный корпус; 1 — вибрирующий цилиндр; 2 — фланцы со сквозными отверстиями; 3 — эластичные элементы крепления; 4 — опоры; 5 — резиновые манжеты; 6 — резонатор; 7, 8 — электромагнитные системы возбуждения окружных и меридиальных колебаний

Fig. 3. Self-oscillating mode for automatically changing the frequency of the vibration field using a cylindrical resonator: a — process pipeline; b — non-magnetic housing; 1 — vibrating cylinder; 2 — flanges with through holes; 3 — elastic fasteners; 4 — supports; 5 — rubber cuffs; 6 — resonator; 7, 8 — electromagnetic excitation systems of circumferential and meridial oscillations

на рис. 1, 2 зависимости подтверждают, что с увеличением частоты f_i вибрационного поля уменьшается относительная амплитуда твердой фазы θ , а следовательно, и её эффективная масса, участвующая в колебаниях среды, согласно соотношению (1).

При реализации информационной системы технически возможно организовать автоматическое изменение частоты вибрационного поля при помощи механического полого проточного резонатора, установленного в потоке суспензии на трубопроводе, согласно рис. 3 [13]. В качестве такого резонатора можно использовать трубку, цилиндр или пластину, снабженные системой возбуждения колебаний, как показано на рис. 3.

Обобщённая характеристика трубчатых, цилиндрических и пластинчатых резонаторов определяется соотношением [12]:

$$f = f_0 \sqrt{A/(A + \rho)}, \quad (10)$$

где f_0 , A , ρ — частота пустого резонатора; постоянная, определяемая экспериментально, и плотность среды, заполняющей резонатор.

Определим плотность суспензии ρ , протекающей через резонатор:

$$\rho = (m_{\text{ж}} + m_{\text{т}} \cdot \theta) / F, \quad (11)$$

где $m_{\text{ж}}$, $m_{\text{т}}$, F — массы единицы длины жидкости, твердых частиц и проходное сечение резонатора.

Часть площади $m_{\text{т}} / \rho_{\text{т}}$ проточного канала резонатора F будет занята твердой фазой, поэтому массу жидкости, на единицу длины резонатора с учётом $C = m_{\text{т}} / F$, определим из соотношения:

$$m_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} \cdot (F - (C \cdot F / \rho_{\text{т}})). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), с учётом $m_{\text{т}} \cdot \theta = C \cdot \rho_{\text{т}} \cdot \theta$, из соотношения (10) получим уравнение для обобщённой градуировочной характеристики резонатора в гетерогенной системе жидкость-твёрдое тело:

$$f = f_0 \sqrt{A / (A + \rho_{\text{ж}} + (\theta_{\text{cp}} - \rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{т}}) \cdot C)}, \quad (13)$$

где θ_{cp} — средняя амплитуда колебаний твёрдых частиц заданной фракции.

Известно, что эффективная работа шаровых мельниц известняка определяется процентом содержания заданной фракции, в нашем методе массовой концентрацией. Фракционный состав суспензии $p(\delta)$ подчиняется распределению Розина-Рамллера:

$$p(\delta) = q \cdot m \cdot \delta^{q-1} \cdot e^{-m \delta^q},$$

де q , m — параметры распределения.

Тогда средняя амплитуда колебаний твёрдых частиц заданной фракции определяется из уравнения:

$$\theta_{\text{cp}} = \int_0^{\delta_{\text{cp}}} \theta(\delta) \cdot p(\delta) \cdot d\delta.$$


ВЫВОДЫ

Получена компьютерная математическая модель динамики гетерогенной среды жидкость-твёрдое тело в технологическом аппарате с барботажем на основе усовершенствования известной модели вследствие учета общей вязкости и плотности среды. Модель позволяет получать информацию путем измерения концентрации пульпы и суспензий с применением проточного механического резонатора любого из использованных в виброплотномерах типов, что значительно расширяет область их применения.

Полученная зависимость применяется для расчета критерия эффективности процесса и определения режима, обеспечивающего наиболее эффективный теплообмен между жидкостью и газом при его барботаже.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Тараненко Ю.К. (2006) Математична модель диференційного віброчастотного датчика концентрації дисперсних систем [Текст] / Ю.К. Тараненко // Вісник Академії митної служби України. Серія: технічні науки (Tararenko Yu.K. (2006) Matematichna model' diferentsynogo vibrachastotnogo datchika kontsentratsii dispersnikh sistem. Visnik Akademii mitnoї sluzhbi Ukraїni. Seriya: tekhnichni nauki). — № 3 — С/Р. 109—116.
2. Шамов Н.А. (2003) Особенности динамики твердых частиц суспензии в моно- и полихроматическом звуковых полях [Текст] / Н.А. Шамов // Труды XXXIII Уральского семинара РАН «Механика и процессы

- управления», раздел «Механика жидкости и газа». — Миасс: Урал. отд. РАН. (Shamov N.A. (2003). Osobennosti dinamiki tverdykh chastits suspensii v mono- i polikhromaticheskom zvukovykh polyakh. Trudy XXXIII Ural'skogo seminar RAN «Mekhanika i protsessy upravleniya», razdel «Mekhanika zhidkosti i gaza»). — С/Р. 72—79.
3. Ермолаев А.Н. (2017) Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред / Ермолаев А.Н., Мельничук О.В. // Электротехнические и информационные комплексы и системы (Yermolayev A.N. (2017). Sovremennyye sredstva izmereniya plotnosti zhidkikh dispersnykh sred . Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy). — Т/У. 13. — № 4. — С/Р. 92—96.
 4. Билинский И.И., Огородник К.В., Яремашена Н.А. (2016) Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов // Научные труды Винницкого национального технического университета (Bilinskiy I.I., Ogorodnik K.V., Yaremishena N.A. (2016). Analiz metodov i sredstv izmereniya plotnosti nefteproduktov. Nauchnyye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta). — № 2. — С/Р. 10—23.
 5. Шурыгин А.М. (2017) Анализ математических моделей устройств виброзащиты технических объектов машиностроительных производств // Информационная среда вуз (Shurygin A.M. (2017) Analiz matematicheskikh modeley ustroystv vibrozashchity tekhnicheskikh ob'yektov mashinostroitel'nykh proizvodstv. Informatsionnaya sreda vuz). — № 1. — С/Р. 335—338.
 6. Гринман И.Г. (1970) Исследование колебаний суспензии с целью гранулометрического анализа твердой фазы пульпы // Автоматизация производственных процессов / И.Г. Гринман, Х.Ш. Нурғалиева, В.В. Шамрай. — Алма-Ата: Наука (Grinman I.G. (1970) Issledovaniye kolebaniy suspensii s tsel'yu granulometricheskogo analiza tvordoy fazy pul'py. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov). — 324 с/р.
 7. Фукс В.А. (1955) Механика аэрозолей / В.А. Фукс. — М.: АН СССР (Fuks V.A. (1955). Mekhanika aerorozoley). — 351 с/р.
 8. Фукс Н.А. (1961) Успехи механики аэрозолей / Н.А. Фукс. — М.: АН СССР (Fuks N.A. (1961) Uspekhi mekhaniki aerorozoley). — 159 с/р.
 9. Гупало Ю.П. (1962) О некоторых закономерностях псевдосжженного слоя и стеснённого падения / Ю.П. Гупало // Инженерно-физический журнал (Gupalo Yu.P. (1962). O nekotorykh zakonomenostyakh psevdoszhzhenogo sloya i stesnonnogo padeniya. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal). — Т/У. 5. — № 1. — С/Р. 96—98.
 10. А.с. 1467451 СССР, МКИ G01N 15/04 Частотный способ седиментационного анализа суспензий: / Ю.К. Тараненко и др. (СССР), — №4219643/24-25; заявл. 03.02.87; опубл. 23.03.89. Бюл. № 11, 1989 г (A.s. 1467451 SSSR. (1989). Chastotnyy sposob sedimentatsionnogo analiza suspensiy; 11).
 11. А.с. 1837210 СССР, МКИ G01N 15/04 Частотный способ седиментационного анализа суспензий: / Ю.К. Тараненко и др. (СССР), — №4852173/25; заявл. 17.07.90; опубл. 30.08. 93. Бюл. № 23, 1993 г (A.s. 1837210 SSSR. (1993). Chastotnyy sposob sedimentatsionnogo analiza suspensiy, 23).
 12. Жуков Ю.П. (1991) Вибрационные плотномеры / Ю.П. Жуков. — М.: Энергоатомиздат (Zhukov Yu.P. (1991) Vibratsionnyye plotnomery. Energoatomizdat). — 144 с/р.
 13. Олийник О.Ю. (2018) Multifunctional vibration frequency transducer with cylindrical resonator / Yu.K. Taranenko, O.Yu. Oliynyk // Measurement Techniques. — Vol. 61. — № 7. — С/Р. 41—46. 

Отримано / received: 23.02.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.В. Лопатиним (Україна).
Prof. V.V. Lopatin, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.