

Моделирование процесса смесеобразования в вибрационных смесителях различного типа

Д.В. Лобанов^{1a}, И.М. Ефремов^{2b}, А.Н. Лобанова^{1c}, А.П. Соколов^{1d}, В.В. Белов^{1e}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

²Академия машиностроения им. Ж.Я. Котина, ул. Бабушкина, 119, Санкт-Петербург, Россия

^ad_lobanov@mail.ru, ^bimefremov@yandex.ru, ^ca_lobanova84@mail.ru, ^dsokol_sdm_06@mail.ru, ^ebelov152@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-1916-1352>,

^b <https://orcid.org/0000-0003-3272-9982>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7762-5565>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3230-380X>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-4039-0755>

Статья поступила 10.09.2019, принята 30.10.2019

В статье рассматривается моделирование процесса смесеобразования в вибрационных роторных и гравитационных смесителях периодического действия. Наиболее эффективным способом процесса перемешивания многокомпонентных сред является метод вибрационной активации. Ранее было установлено, что вибрация, создаваемая в процессе перемешивания на смешиваемую массу, позволяет уменьшить плотность смеси, силы трения, сцепления, а также эффективно снизить вязкость. Таким образом, выбрав вибрационный тип перемешивания многокомпонентных смесей в качестве наиболее перспективного, был проведен подробный анализ процессов смешивания в вибрационных роторных и гравитационных смесителях периодического действия. На конструкции вибрационных смесителей различного типа авторами было получено несколько патентов Российской Федерации на изобретения и полезные модели, устройство которых позволяет реализовать повышение производительности, снижение затрат энергии на процесс смешивания, повышение подвижности и турбулизации смеси, обусловленных однородным тиксотропным разрушением структуры материала во всем пространстве камеры смешивания. На основе математического моделирования с использованием теории подобия и анализа размерностей были получены критериальные уравнения, характеризующие процесс перемешивания многокомпонентных сред, по основным реологическим параметрам — удельному сопротивлению перемешиванию и динамической вязкости многокомпонентной смеси. Полученные уравнения позволяют оценить характер разрушения структуры многокомпонентной среды в вибрационных смесителях различного типа и тем самым выбирать рациональные параметры конструктивных элементов вибросмесителей в зависимости от природы и состояния смешиваемых материалов. На основе данных критериальных зависимостей получены уточненные уравнения степени сепарации по основным реологическим параметрам, позволяющим оценивать и прогнозировать качество получаемых в процессе вибрационного перемешивания многокомпонентных смесей.

Ключевые слова: анализ размерностей; реологические параметры; удельное сопротивление смеси перемешиванию; динамическая вязкость смеси; степень сепарации; процесс смесеобразования; вибрация; смеситель; амплитуда; частота; колебания.

Modeling the process of mixing in various types of vibrating mixers

D.V. Lobanov^{1a}, I.M. Efremov^{2b}, A.N. Lobanova^{1c}, A.P. Sokolov^{1d}, V.V. Belov^{1e}

¹Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

²Academy of Mechanical Engineering named after Zh.Ya. Kotin; 119, Babushkin St., St. Petersburg, Russia

^ad_lobanov@mail.ru, ^bimefremov@yandex.ru, ^ca_lobanova84@mail.ru, ^dsokol_sdm_06@mail.ru, ^ebelov152@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-1916-1352>,

^b <https://orcid.org/0000-0003-3272-9982>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7762-5565>,

^d <https://orcid.org/0000-0003-3230-380X>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-4039-0755>

Received 10.09.2019, accepted 30.10.2019

The article discusses the modeling of the process of mixture formation in vibratory rotary and gravitational batch mixers. The most effective method for mixing multicomponent media is the vibration activation method. It was previously found that the vibration, created during mixing on the mixed mass, allows to reduce the density of the mixture, friction, adhesion, as well as effectively reduce the viscosity. Thus, choosing the vibrational type of mixing of multicomponent mixtures as the most promising one, a detailed analysis of the mixing processes in vibrational rotary and gravitational batch mixers has been carried out. On the design of various types of vibratory mixers, the authors have obtained several patents of the Russian Federation for inventions and utility models, the design of which made

it possible to reach productivity, reduce energy costs for the mixing process, increase mobility and turbulization of the mixture due to uniform thixotropic destruction of the material structure in the entire space of the mixing chamber. Based on mathematical modeling using the theory of similarity and analysis of dimensions, criterion equations have been obtained that characterize the process of mixing multicomponent media using the main rheological parameters - specific resistance to mixing and dynamic viscosity of a multicomponent mixture. The obtained equations allow to evaluate the nature of the destruction of the structure of a multicomponent medium in various types of vibrational mixers and thereby choose the rational parameters of the structural elements of the vibration mixers depending on the nature and state of the materials being mixed. Based on the data of the criterion dependences, the refined equations of the degree of separation are obtained for the main rheological parameters, which allow one to evaluate and predict the quality of multicomponent mixtures obtained during vibration mixing.

Keywords: dimensional analysis; rheological parameters; specific resistance of the mixture to stirring; dynamic viscosity of the mixture; degree of separation; mixture formation process; vibration; mixer; amplitude; frequency; fluctuations.

Введение. В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений является применение многокомпонентных смесей для различных отраслей промышленности. Связано это с тем, что использование новых композитных и наноматериалов является основной составляющей в процессе приготовления данных смесей. При этом технологии, применяемые в процессе приготовления данного типа смесей, играют главенствующую роль в разработке нового технологического оборудования, ключевым предпочтением в которой является создание различных типов смесительных машин.

Интенсификация различных отраслей промышленности в области перемешивания многокомпонентных материалов обуславливает задачу совершенствования технически обоснованных решений конструктивных параметров смесительных машин.

С целью улучшения процесса смешивания в качестве наиболее эффективного способа может быть рассмотрен метод вибрационной активации. Установлено, что вибрационное поле в процессе перемешивания позволяет реализовать ряд важных задач: уменьшение плотности смешиваемой массы, сил трения, сцепления, а также эффективное снижение вязкости.

Таким образом, выбрав вибрационный тип перемешивания многокомпонентных смесей в качестве наиболее перспективного, необходимо провести подробный анализ вибрационных смесительных машин гравитационного типа с целью выявления наиболее оптимального конструктивного решения. На основе запатентованных конструкций вибрационных смесителей предлагается в качестве оптимизации геометрических параметров виброактиваторов рассматривать изменение вариативных геометрических форм корпусов вибраторов как наиболее технологичное решение.

Основные положения. Анализируя работы многих авторов, можно сделать вывод о том, что вибрационные смесители различного типа позволяют наиболее эффективно приготавливать многокомпонентные смеси, когда на составляющие смеси осуществляется многократное воздействие [1–4]. При этом подавляющее большинство конструкций вибрационных смесительных агрегатов соответствует вибросмесителям с гравитационным и принудительным типом перемешивания (ротаторный смеситель), схемы которых представлены на рис. 1 и 2 [1–8].

Поэтому процесс перемешивания с применением вибрации — один из наиболее эффективных методов повышения качества упруго-вязко-пластичных сме-

сей. Применение вибрации в процессе перемешивания многокомпонентных сред позволяет обнаружить эффект тиксотропного разжижения данного типа смесей. Объясняется это тем, что вследствие множественного соударения частиц перемешиваемой среды проявляется способность компонентов смеси эффективно диффундировать между собой. При интенсивном воздействии вибрации на смесь происходит более равномерное распределение ее составляющих компонентов, улучшается структура, смесь становится более однородной, а, следовательно, повышается ее качество [1–8].

По результатам работ разных авторов в данной области можно выделить следующее:

- 1) при использовании вибрации с увеличением частоты и амплитуды колебаний значение вязкости смеси уменьшается;
- 2) при сколь угодно интенсивном вибрировании имеет место вязкость предельно разрушенной структуры;

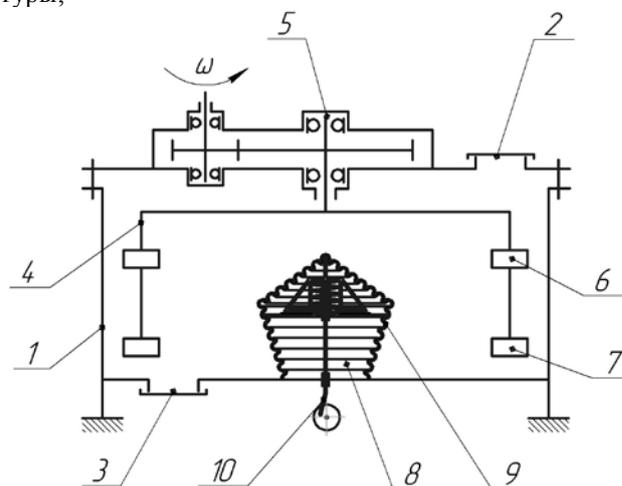


Рис. 1. Вибрационный ротаторный смеситель: 1 — корпус смесителя; 2 — окно загрузки компонентов смеси; 3 — окно выгрузки многокомпонентной смеси; 4 — ротор; 5 — редуктор с приводом вращения ротора; 6, 7 — лопасти; 8 — виброактиватор; 9 — корпус виброактиватора; 10 — кривошипно-шатунный механизм

3) эффективная вязкость в граничных условиях имеет зависимость от времени виброактивации, физико-химических свойств смешиваемых компонентов смеси, координатной точки ее замера, амплитуды и частоты виброактивации, формы корпуса виброактиватора.

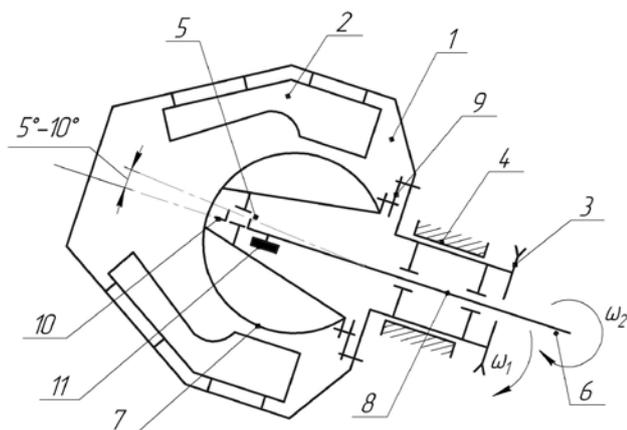


Рис. 2. Вибрационный гравитационный смеситель: 1 — барабан; 2 — лопасти; 3 — привод вращения лопастей; 4 — опора; 5 — виброактиватор; 6 — привод вращения виброактиватора; 7 — корпус виброактиватора; 8 — коленчатый вал; 9 — упругий элемент; 10 — шагунная опора; 11 — дисбаланс

Следует отметить, что смесители в первую очередь могут отличаться по форме и размерам. Неотъемлемым элементом конструкции смесителей вибрационного типа является внутренний рабочий орган – виброактиватор. Установлено, что вибрационное поле в процессе перемешивания позволяет реализовать ряд важных задач: уменьшение плотности смешиваемой массы, сил трения, сцепления, а также эффективное снижение вязкости. Таким образом, выбрав вибрационный тип перемешивания многокомпонентных смесей в качестве наиболее перспективного, необходимо провести подробный анализ вибрационных смесительных машин гравитационного типа с целью выявления наиболее оптимального конструктивного решения.

На первоначальном этапе поиска новых технических решений было проведено систематическое разделение типовой конструкции виброактиватора на две подсистемы: создающую колебания и передающую колебания.

Появление вибрационных агрегатов различного назначения и многообразие их конструктивных решений подразумевают развитие вибротехники в целом.

Методы исследования. Для теоретической аппроксимации зависимостей, учитывающих все факторы вибрационного воздействия данных типов конструкций вибросмесителей на приготавливаемую смесь, необходим анализ исследования процесса разрушения структуры компонентов, загружаемых в смеситель, и разработка обоснованной гипотезы о взаимосвязях параметров, определяющих процесс.

Анализ различных работ показывает, что наиболее эффективным инструментом для теоретического описания и экспериментального исследования данных процессов является метод физического моделирования, базирующийся на теории подобия и анализе размерностей, которые можно успешно использовать для построения обоснованных гипотез о взаимосвязях различных параметров сложной системы [1; 2; 9–21].

Инструмент физического моделирования может эффективно использоваться для описания и построения гипотез о связности критериев сложных систем. Впервые инструмент физического моделирования, основан-

ный на критериальном анализе, был предложен Н.А. Морозовым [13], а затем широко использован за рубежом Э. Бакингом и другими авторами [14] в виде π -теоремы Бакинга и, впоследствии, MLT-теории [15]. Метод физического моделирования основывается на том, что при имеющемся обоснованном физически значимом выражении, которое включает в себя некоторое количество переменных, описываемых независимыми физическими величинами, исходное выражение равнозначно критериальному выражению, которое включает в себя множество безразмерных критериев, выраженных из исходных величин. Метод физического моделирования может быть использован при вычислении множества безразмерных критериев по данным значениям физических величин, даже если выражение, которое связывает эти величины, является неизвестным.

Существует множество способов выбора безразмерных критериев. Инструмент физического моделирования, основанный на критериальном анализе, может не только в полной мере демонстрировать, как это можно сделать, но и эффективно обеспечивает физическую значимость полученных безразмерных критериев.

В свою очередь, теория подобия позволяет достаточно точно установить физическую значимость полученных критериев при описании физических процессов и является эффективным средством для изучения свойств самих процессов. Практически любые физические процессы, системы или явления являются подобными в сходственных моментах времени при условии схожести точек пространства значений переменных величин, описывающих одну из систем по граничным условиям, которые являются пропорциональными по отношению к величинам другой подобной системы. Коэффициентом пропорциональности величин для данных подобных схожих систем при определенных граничных условиях является коэффициент подобия. При этом метод физического подобия элементарно и наглядно представляет собой обобщенное свойство подобия в геометрии, подразумевающее пропорциональность геометрических параметров схожих фигур и тел, а свойство физического подобия — схожесть в пространстве и времени полей соответствующих физических величин двух подобных систем. Так, например, свойство подобия в кинематике обуславливает схожесть двух рассматриваемых систем движений при подобии полей скорости; свойство подобия в динамике подразумевает схожесть систем физических силовых полей; при механическом подобии существует подобие динамических, геометрических и кинематических параметров механических систем; свойство подобия в тепловых процессах обеспечивает подобие значений полей тепловых потоков и температур; свойство подобия в электродинамике, соответственно, обеспечивает подобие полей электромагнитных сил, нагрузок, токов и мощностей.

Все представленные свойства подобия являются частными случаями свойства физического подобия. При достаточно глубоких исследованиях с учетом сложных физико-химических систем усложняются и методы теоремы подобия для этих систем. Пропорциональность для подобных систем и всех описываю-

щих их величин является причиной одинаковых численных значений всех безразмерных комбинаций, которые можно составить из данных величин. Тем самым, критерии подобия являют собой безразмерные математические сочетания, составленные из определяющих величин изучаемых систем. Причем, критерий совокупного подобия физических процессов также будет являться набором сочетаний из критериев подобия.

Теория подобия позволяет обеспечить понимание свойств определенно подобных систем, но метод физического моделирования реализует решение прикладной задачи, которая заключается главным образом в установлении адекватности модели, процессы которой были подобны процессам, происходящим в образце-аналоге. Метод физического моделирования позволяет также обеспечить обобщение результатов единичного эксперимента в указанных пределах закономерного распространения результатов.

Таким образом, теория и эксперимент могут эффективно использоваться в связке методологии теории подобия, а экспериментальная часть исследований, выполненная на основе свойств подобия, позволяет реализовать простоту аналитического решения прикладной задачи.

Моделирование процессов смешивания. Проведенный анализ позволил вывести функциональные зависимости определяемых параметров – удельного сопротивления p (Па) смеси перемешиванию и динамической вязкости μ (Па·с) смеси [1–4; 19–21]:

для вибрационного гравитационного смесителя:

$$p_1 = f(A_1, \omega_1, g, \rho_1, F_1, V_1, D_1, d_1); \quad (1)$$

$$\mu_1 = f(A_1, \omega_1, g, \rho_1, F_1, V_1, D_1, d_1); \quad (2)$$

для роторно-вибрационного смесителя:

$$p_2 = f(A_2, \omega_2, g, \rho_2, F_2, V_2, D_2, d_2, h, H); \quad (3)$$

$$\mu_2 = f(A_2, \omega_2, g, \rho_2, F_2, V_2, D_2, d_2, h, H), \quad (4)$$

где A_1, A_2 — амплитуды колебаний виброактиваторов, m ; ω_1, ω_2 — частоты колебаний виброактиваторов, c^{-1} ; g — ускорение силы тяжести, m/c^2 ; ρ_1, ρ_2 — плотности смесей, $кг/м^3$; F_1, F_2 — площади поверхности взаимодействия корпусов виброактиваторов с многокомпонентной средой, $м^2$; V_1, V_2 — объемы загрузки смеси, $м^3$; D_1, D_2 — внутренний средний диаметр окружности барабана вибрационного гравитационного смесителя и внутренний средний диаметр окружности камеры смешивания роторно-вибрационного смесителя соответственно, $м$; d_1, d_2 — внешний средний диаметр окружности виброактиватора гравитационного смесителя и внешний средний диаметр окружности виброактиватора роторного смесителя соответственно, $м$; h — высота слоя смеси для роторно-вибрационного смесителя, $м$; H — высота виброактиватора для роторно-вибрационного смесителя, $м$.

Переменные формул (1), (2), (3) и (4) имеют следующий вид размерностей (табл. 1).

Таблица 1

Таблица анализа размерностей

Физические величины	Обозначение	Размерность
Динамическая вязкость смеси	μ	Па · с
Удельное сопротивление смеси перемешиванию	p	Па
Плотность смеси	ρ	кг/м ³
Амплитуда колебаний виброактиватора	A	м
Частота колебаний виброактиватора	ω	с ⁻¹
Ускорение силы тяжести	g	м/с ²
Площадь поверхности взаимодействия корпуса виброактиватора с многокомпонентной средой	F	м ²
Объем загрузки смеси	V	м ³
Внутренний средний диаметр окружности барабана или камеры смешивания	D	м
Внешний средний диаметр виброактиватора	d	м
Высота слоя смеси	h	м
Высота виброактиватора	H	м

Зависимости (1), (2), (3) и (4) после применения анализа размерностей можно привести к критериальному виду, т. е. представить в виде безразмерных переменных посредством соответствующих величин формул (1), (2), (3) и (4), через выбор независимых па-

раметров, имеющих независимые размерности: амплитуды колебаний A , частоты ω , плотности ρ смеси, и выражая через них оставшиеся параметры:

для вибрационного гравитационного смесителя:

$$\frac{\rho_1 \cdot \omega_1^2 \cdot A_1^2}{\rho_1} = c_{11} \cdot \left(\frac{A_1 \cdot \omega_1^2}{g} \right)^{x_{11}} \cdot \left(\frac{F_1 \cdot A_1}{V_1} \right)^{y_{11}} \times \left(\frac{d_1}{D_1} \right)^{z_{11}} \cdot f_{11}^{u_{11}} ;$$

$$\frac{\rho_1 \cdot \omega_1 \cdot A_1^2}{\mu_1} = c_{12} \cdot \left(\frac{A_1 \cdot \omega_1^2}{g} \right)^{x_{12}} \cdot \left(\frac{F_1 \cdot A_1}{V_1} \right)^{y_{12}} \times \left(\frac{d_1}{D_1} \right)^{z_{12}} \cdot f_{12}^{u_{12}} ,$$

для роторно-вибрационного смесителя:

$$\frac{\rho_2 \cdot \omega_2^2 \cdot A_2^2}{\rho_2} = c_{21} \cdot \left(\frac{A_2 \cdot \omega_2^2}{g} \right)^{x_{21}} \cdot \left(\frac{F_2 \cdot A_2}{V_2} \right)^{y_{21}} \times \left(\frac{d_2}{D_2} \right)^{z_{21}} \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^{w_{21}} \cdot f_{21}^{u_{21}} ;$$

$$\frac{\rho_2 \cdot \omega_2 \cdot A_2^2}{\mu_2} = c_{22} \cdot \left(\frac{A_2 \cdot \omega_2^2}{g} \right)^{x_{22}} \cdot \left(\frac{F_2 \cdot A_2}{V_2} \right)^{y_{22}} \times \left(\frac{d_2}{D_2} \right)^{z_{22}} \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^{w_{22}} \cdot f_{22}^{u_{22}} ,$$

где $\frac{\rho_1 \cdot \omega_1^2 \cdot A_1^2}{\rho_1}$, $\frac{\rho_2 \cdot \omega_2^2 \cdot A_2^2}{\rho_2}$ — безразмерные критерии, учитывающие обратное отношение удельного сопротивления смеси перемешиванию к плотности и квадрату скорости вибрирования; $\frac{\rho_1 \cdot \omega_1 \cdot A_1^2}{\mu_1}$,

$\frac{\rho_2 \cdot \omega_2 \cdot A_2^2}{\mu_2}$ — безразмерные критерии, учитывающие отношение динамической вязкости смеси к ее плотности, частоте и квадрату амплитуды колебаний виброактиватора; $\frac{A_1 \cdot \omega_1^2}{g}$, $\frac{A_2 \cdot \omega_2^2}{g}$ — безразмерные критерии, учитывающие отношение ускорения силы тяжести к ускорению колебаний виброактиватора; $\frac{F_1 \cdot A_1}{V_1}$,

$\frac{F_2 \cdot A_2}{V_2}$ — безразмерные критерии, учитывающие передаточную способность вибрации на многокомпонентную среду поверхностью рабочего органа виброактиватора; f_{11} , f_{12} , f_{21} , f_{22} — безразмерные критерии геометрии формы, учитывающие и характеризующие геометрические параметры корпусов виброактиваторов для смесителей различного типа; $\frac{d_1}{D_1}$, $\frac{d_2}{D_2}$, $\frac{h}{H}$

— безразмерные критерии, учитывающие граничные условия процесса смешивания; c_{11} , c_{12} , c_{21} , c_{22} — поправочные коэффициенты, учитывающие физико-механические и физико-химические свойства упруго-вязко-пластичной многокомпонентной среды; x_{11} , x_{12} , x_{21} , x_{22} , y_{11} , y_{12} , y_{21} , y_{22} , z_{11} , z_{12} , z_{21} , z_{22} , u_{11} , u_{12} , u_{21} , u_{22} , w_{21} , w_{22} — степенные коэффициенты.

Полученные критериальные уравнения (5), (6), (7), (8) могут быть использованы при оценке характера разрушения структуры упруго-вязко-пластичной многокомпонентной среды в корпусе или барабане смесителя и тем самым позволяют выбирать наиболее приемлемые конструктивные параметры составляющих элементов вибрационных смесителей в зависимости от условий перемешивания упруго-вязко-пластичных многокомпонентных сред.

Однако с точки зрения качественного приготовления упруго-вязко-пластичных многокомпонентных смесей необходимо определить критерий, характеризующий качественную оценку их перемешивания.

Анализ различных источников [19–21] показывает, что наиболее приемлемым критерием оценки в данном аспекте является коэффициент разброса (вариационный коэффициент, или степень сепарации).

М.В. Бунин и А.А. Богомолов с помощью анализа совокупности процесса перемешивания многокомпонентных сред предложили описывать данный вариационный коэффициент S следующей формулой [19–21]:

$$S = a + (S_{\max} - a) \cdot e^{-k \cdot x} ,$$

где a — минимальное значение степени сепарации; S_{\max} — максимальное значение степени нераспределенности составляющих смеси, равное 1; k — постоянная процесса смешивания, которая зависит от физико-химических свойств смешиваемых материалов и определяется из значений параметров удельного сопротивления смеси перемешиванию p или динамической вязкости μ смеси; x — коэффициент поточного движения, равный $\omega \cdot t$.

Для удобства и универсальности применения формулы (9) постоянную процесса смешивания k необходимо представить в безразмерном виде [19–21].

Для представления постоянной процесса смешивания k в виде критериальной зависимости необходимо вывести следующие уравнения по основным реологическим определяемым параметрам — как для удельного сопротивления смеси перемешиванию p , так и для динамической вязкости μ смеси:

для вибрационного гравитационного смесителя:

$$p_1 = f(\omega_{zp}, \rho_1, d_{zp}) ;$$

$$\mu_1 = f(\omega_{zp}, \rho_1, d_{zp}) ,$$

для роторно-вибрационного смесителя:

$$p_2 = f(\omega_p, \rho_2, d_p) ;$$

$$\mu_2 = f(\omega_p, \rho_2, d_p), \tag{13}$$

где ρ_1, ρ_2 — плотности смесей, кг/м^3 ; ω_{zp}, ω_p — частоты вращения барабана вибрационного гравитационного смесителя и лопастного ротора (лопастей) роторно-вибрационного смесителя соответственно, с^{-1} ; d_{zp}, d_p — средний диаметр окружности, описываемой лопастями барабана вибрационного гравитационного смесителя, и средний диаметр окружности, описываемой лопастями ротора роторно-вибрационного смесителя соответственно, м .

Переменные зависимостей (10), (11), (12) и (13) можно представить в виде размерностей (табл. 2).

Используя инструмент анализа размерностей, о котором было указано выше, зависимости (10), (11), (12) и (13) можно преобразовать в следующий критериальный вид:

для вибрационного гравитационного смесителя:

$$k_{zp} = \frac{\rho_1 \cdot \omega_{zp}^2 \cdot d_{zp}^2}{P_1}; \tag{14}$$

$$k_{zp} = \frac{c_{zp} \cdot \rho_1 \cdot \omega_{zp} \cdot d_{zp}^2}{\mu_1}, \tag{15}$$

для роторно-вибрационного смесителя:

$$k_p = \frac{\rho_2 \cdot \omega_p^2 \cdot d_p^2}{P_2}; \tag{16}$$

$$k_p = \frac{c_p \cdot \rho_2 \cdot \omega_p \cdot d_p^2}{\mu_2}, \tag{17}$$

Таблица 2

Таблица анализа размерностей

Физические величины	Обозначение	Размерность
Удельное сопротивление смеси перемешиванию	P	Па
Динамическая вязкость смеси	μ	Па · с
Плотность смеси	ρ	кг/м^3
Частота вращения лопастей или барабана	ω	с^{-1}
Средний диаметр окружности, описываемой лопастями барабана или ротора	d	м

где c_{zp}, c_p — коэффициенты пропорциональности, учитывающие равенство постоянных k для вибрационного гравитационного и роторно-вибрационного смесителей соответственно.

Из выражений (14), (15), (16) и (17) следует, что показатели k (для одного типа смесителя), зависящие от удельного сопротивления смеси перемешиванию P и динамической вязкости μ смеси, при прочих равных структурно-реологических свойствах смеси будут равны друг другу с учетом поправочных коэффициентов c_{zp}, c_p , которые можно определить лишь экспериментально.

Подставляя выражения (14), (15), (16) и (17) в формулу (9), получим:

для вибрационного гравитационного смесителя:

$$S_{zp} = a + (S_{\max} - a) \cdot e^{-\frac{\rho_1 \cdot \omega_{zp}^3 \cdot d_{zp}^2 \cdot t_1}{P_1}}; \tag{18}$$

$$S_{zp} = a + (S_{\max} - a) \cdot e^{-\frac{c_{zp} \cdot \rho_1 \cdot \omega_{zp}^2 \cdot d_{zp}^2 \cdot t_1}{\mu_1}}, \tag{19}$$

для роторно-вибрационного смесителя:

$$S_p = a + (S_{\max} - a) \cdot e^{-\frac{\rho_2 \cdot \omega_p^3 \cdot d_p^2 \cdot t_2}{P_2}}; \tag{20}$$

$$S_p = a + (S_{\max} - a) \cdot e^{-\frac{c_p \cdot \rho_2 \cdot \omega_p^2 \cdot d_p^2 \cdot t_2}{\mu_2}}. \tag{21}$$

Заключение. Выражая значения удельного сопротивления P смеси перемешиванию и динамической вязкости μ смеси из критериальных уравнений (5), (6), (7) и (8), с учетом данных, определяемых экспериментально, и подставляя их в соответствующие формулы (14), (15), (16) и (17), можно получить искомые значения степени сепарации S в зависимости от характера разрушения структуры упруго-вязко-пластичной многокомпонентной среды и конструктивных параметров вибросмесителей. Таким образом, полученные уравнения (18), (19), (20) и (21) позволяют строить прогнозы на качественные характеристики получаемых упруго-вязко-пластичных многокомпонентных смесей и определять рациональные технологические параметры вибрационных смесителей для приготовления упруго-вязко-пластичных смесей с различными свойствами при требуемом качестве.

Литература

- Кузьмичев В.А. Методы моделирования и проектирования вибрационных смесительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1989. 32 с.
- Ефремов И. М. Интенсификация процесса и выбор параметров роторно-вибрационного смесителя: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1985. 252 с.
- Figura K.N., Yefremov I.M., Lobanov D.V. Research into

fatigue crack life characteristics of bellows operated under high-frequency load // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1025–1026. P. 162–166.

4. Yefremov I.M., Lobanov D.V., Figura K.N. The issue of balancing of eccentric-type vibrators // *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering: Proceedings of the international Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering, Incheon, South Korea, May 29–31, 2015*. London: CRC Press, 2016. P. 299–302.

5. Михайлов Н.В., Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н. Реология тиксотропных систем. Киев: Наукова думка, 1972. 120 с.

6. Овчинников П.Ф. Виброреология. Киев: Наукова думка, 1983. 272 с.

7. Лобанов Д.В., Лобанова А.Н., Ефремов И.М., Федоров В.С., Фигура К.Н., Попов Е.В., Белов В.В., Белова Т.В. Вибрационный смеситель: пат. 2626643 Рос. Федерация. № 2015157098; заявл. 29.12.15; опубл. 04.07.17, Бюл. № 19. 13 с.

8. Лобанов Д.В., Ефремов И.М., Лобанова А.Н., Дивин Д.В., Соколов А.П., Багаудинов И.Б. Гравитационный смеситель: пат. 148598 Рос. Федерация. № 2014108789; заявл. 06.03.14; опубл. 10.12.12, Бюл. № 34. 2 с.

9. Barenblatt G.I. *Scaling*. Cambridge University Press, 2003. 171 p.

10. Barrow J.D. *The Constants of Nature*. Random House, 2002. 352 p.

11. Wilczek F. On Absolute Units, I: Choices. *Physics Today*, Vol. 58, October Is. 2005.

12. Wilkinson W.L. *Non-Newtonian fluids: fluid mechanics, mixing and heat transfer*. Pergamon Press, 1960. 138 p.

13. Морозов Н.А. Основы качественного физико-математического анализа и новые физические факторы, обнаруживаемые им в различных явлениях природы. М.: Тип. т-ва И.Д. Сытина, 1908. 402 с.

14. Buckingham E. On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations // *The Physical Review*. 1914. Vol. 4, № 4. P. 345–376.

15. Bolster D., Hershberger R.E., Donnelly R.J. Dynamic similarity, the dimensionless science // *Physics Today*. 2011. Vol. 64, P. 42–47.

16. Huntley H.E. *Dimensional analysis*. Dover Publ. Inc., 1967. 158 p.

17. Taylor E.S. *Dimensional analysis for engineers*. Clarendon Press, Oxford, 1974. 162 p.

18. Hicks B.B. Some limitations of dimensional analysis and power laws. *Bound. Layer Meteor.*, Vol. 14, 1978. P. 567–569.

19. Ефремов И.М., Лобанов Д.В., Лиханов А.А., Ивасиив Д.М. Теоретические аспекты процесса смесеобразования бетонных смесей // *Механизация строительства*. 2011. № 9. С. 16–17.

20. Богомолов А.А., Корнеев А.А. Модификация уравнения процесса смесеобразования // *Механизация строительства*. 2009. № 11. С. 16–17.

21. Lobanov D.V., Efremov I.M., Lobanova A.N., Popov E.V. Description of the process of vibrational mixing of elastoviscoplastic multicomponent mixtures // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53, № 7–8, November. P. 495–500.

References

1. Kuz'michev V.A. Methods of modeling and design of vibration mixing machines: avtoref. dis. ... d-ra. tekhn. nauk. L., 1989. 32 p.

2. Efremov I.M. Process Intensification and Selection of Parameters of Rotating Vibrating Mixer: dis. ... kand. tekhn. nauk. L., 1985. 252 p.

3. Figura K.N., Yefremov I.M., Lobanov D.V. Research into fatigue crack life characteristics of bellows operated under high-frequency load // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1025–1026. P. 162–166.

4. Yefremov I.M., Lobanov D.V., Figura K.N. The issue of balancing of eccentric-type vibrators // *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering: Proceedings of the international Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering, Incheon, South Korea, May 29–31, 2015*. London: CRC Press, 2016. P. 299–302.

5. Mihajlov N.V., Ovchinnikov P.F., Kruglickij N.N. Rheology of Thixotropic Systems. Kiev: Naukova dumka, 1972. 120 p.

6. Ovchinnikov P.F. *Vibrorheology*. Kiev: Naukova dumka, 1983. 272 p.

7. Lobanov D.V., Lobanova A.N., Efremov I.M., Fedorov V.S., Figura K.N., Popov E.V., Belov V.V., Belova T.V. Vibration mixer: pat. 2626643 Ros. Federaciya. № 2015157098; zavavl. 29.12.15; opubl. 04.07.17, Byul. № 19. 13 p.

8. Lobanov D.V., Efremov I.M., Lobanova A.N., Divin D.V., Sokolov A.P., Bagaudinov I.B. Gravity mixer: pat. 148598 Ros. Federaciya. № 2014108789; zavavl. 06.03.14; opubl. 10.12.12, Byul. № 34. 2 p.

9. Barenblatt G.I. *Scaling*. Cambridge University Press, 2003. 171 p.

10. Barrow J.D. *The Constants of Nature*. Random House, 2002. 352 p.

11. Wilczek F. On Absolute Units, I: Choices. *Physics Today*, Vol. 58, October Is. 2005.

12. Wilkinson W.L. *Non-Newtonian fluids: fluid mechanics, mixing and heat transfer*. Pergamon Press, 1960. 138 p.

13. Morozov N.A. Principles of Qualitative Physicomathematical Analysis and New Physical Factors Disclosed by It in Various Natural Phenomena. M.: Tip. t-va I.D. Sytina, 1908. 402 p.

14. Buckingham E. On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations // *The Physical Review*. 1914. Vol. 4, № 4. P. 345–376.

15. Bolster D., Hershberger R.E., Donnelly R.J. Dynamic similarity, the dimensionless science // *Physics Today*. 2011. Vol. 64, P. 42–47.

16. Huntley H.E. *Dimensional analysis*. Dover Publ. Inc., 1967. 158 p.

17. Taylor E.S. *Dimensional analysis for engineers*. Clarendon Press, Oxford, 1974. 162 p.

18. Hicks B.B. Some limitations of dimensional analysis and power laws. *Bound. Layer Meteor.*, Vol. 14, 1978. P. 567–569.

19. Efremov I.M., Lobanov D.V., Lihanov A.A., Ivasiiv D.M. Theoretical aspects of the process of mixing concrete mixtures // *Mekhanizaciya stroitel'stva*. 2011. № 9. P. 16–17.

20. Bogomolov A.A., Korneev A.A. Modification of equation of mixing process // *Mekhanizaciya stroitel'stva*. 2009. № 11. P. 16–17.

21. Lobanov D.V., Efremov I.M., Lobanova A.N., Popov E.V. Description of the process of vibrational mixing of elastoviscoplastic multicomponent mixtures // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53, № 7–8, November. P. 495–500.