

УДК 621.663.3

Мудров Александр Григорьевич

доктор технических наук, профессор

E-mail: Alexmudrov42@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Конструкции и модель смешения в аппаратах с мешалкой

Аннотация

Постановка задачи. Существующие аппараты с мешалкой работают в стационарном режиме с большими затратами времени и энергии, при недостаточной однородности смеси. Причины: наличие зон в корпусе, где отсутствует или минимальное движение перемешиваемых материалов, слабое воздействие рабочих органов. Цель исследования – создать устройства, лишенные недостатков известных аппаратов с мешалкой, разработать модель перемешивания жидких смесей.

Результаты. Созданы новые пространственные аппараты с мешалкой с угловым переменным вращением и с разными законами движения рабочих органов, конструкции которых защищены патентами на изобретения. Устройства позволяют упростить конструкции и существенно интенсифицировать процесс смесеобразования по всем технико-эксплуатационным показателям. Предложена диффузионно-инерционная модель смешения, которая характеризует концентрацию контролируемого компонента и время процесса.

Выводы. Значимость полученных результатов для перемешивающей строительной техники заключается в создании различных групп аппаратов с мешалкой, которые существенно сокращают время перемешивания различных материалов, приготавливают смеси высокой однородности, просты по конструкции, надежны и имеют высокий ресурс работы.

Ключевые слова: переменная угловая скорость, перемешивание, вращательные шарниры пространственные, аппараты с мешалкой, модель смешения материалов.

Введение

Большая часть существующих аппаратов с мешалкой работают в основном при стационарном режиме работы, т.е. при постоянной угловой скорости рабочих органов. При таком способе воздействия на перемешиваемую среду в объеме емкости имеются зоны, в которых скорость потока равна нулю или очень мала, т.е. жидкость этих зон практически не участвует в движении и, следовательно, не перемешивается, ухудшая тем самым степень однородности готовой смеси и увеличивая время перемешивания и энергозатраты процесса. Кроме этого, с течением времени скорость движения основной жидкости становится равной скорости рабочего органа, т.е. их относительного движения не происходит. В этом заключаются существенные недостатки процесса смешения существующим способом в аппаратах с мешалкой при постоянном режиме работы рабочих органов.

В совершенствовании аппаратов с мешалкой использовали сообщение рабочему органу сложной траектории путем применения второго источника привода или привод через сложный передаточный механизм. Однако применяемые для этой цели способы не обеспечивали требуемое качество (однородность) перемешивания, экономичность процесса, совершенство конструкций, надежность и ресурс работы.

Анализ литературных отечественных источников [1, 2] и зарубежных [3, 4, 5] показал, что существенно улучшает процесс перемешивания в аппаратах с мешалкой при нестационарном режиме работы рабочих органов.

Однако известные в технике преобразующие механизмы мало подходят для практического внедрения в аппаратах с мешалкой, так как у них небольшой диапазон регулирования частоты вращения и труднорегулируемый закон движения звеньев, они многозвенны, передают небольшие моменты, ненадежны в работе.

Разработок новых преобразующих механизмов для этой цели практически нет, они индивидуальны и создание их базируется на опыте и интуиции специалистов. До настоящего времени отсутствуют публикации о наличии какой-либо теории их проектирования,

классификационных групп и глубоких исследований, нет модели процесса смешения в аппаратах с мешалкой со сложным пространственным движением рабочих органов.

Два типа аппаратов с мешалкой

Процесс создания аппаратов с мешалкой, как и любых устройств, состоит из двух основных стадий: проектирования и изготовления. Главенствующая роль здесь играет стадия проектирования, ибо на этом этапе закладываются основные параметры устройств и показатели качества: энергетические, силовые, кинематические, надежности, ремонтпригодности, эстетичности, технологические, экономические, себестоимости и др. Нами, для создания аппаратов с мешалкой, использован комплексный метод поиска новых решений. Он включает: теорию решений изобретательских задач (ТРИЗ), морфологический, метод мозговой атаки, метод эвристических приемов, блок преобразования технической системы, операторы и массивы информации.

Приемами метода комплексного поиска решений удалось создать несколько типов аппаратов с мешалкой, в которых пространственные передаточные механизмы преобразуют постоянное вращение вала источника привода в переменное вращение рабочих органов или же звенья передаточных механизмов одновременно выполняют и функции рабочих органов.

Подробнее рассмотрим по одному типу мешалок из первой и второй групп.

Кинематическая схема мешалки первого типа показана на рис. 1.

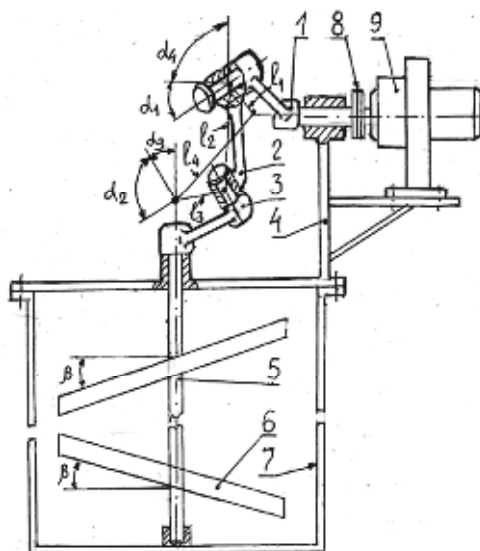


Рис. 1. Схема мешалки первого типа

В этой конструкции постоянное вращение вала источника привода 9 (например, мотор-редуктора) преобразуется в переменное вращение рабочего вала 5 [6]. На валу 5 закреплены под углом β к оси вала рабочие лопасти 6, которые могут быть расположены в разных сочетаниях так, чтобы они охватывали траекториями движений весь объем корпуса – резервуара 7.

Лопасты могут быть изготовлены из пластин разной длины и разной геометрической формы, например, в виде пропеллера и т.д.

Рабочий вал 5 шарнирно установлен одним концом на днище корпуса 7, а другим концом - на крышке корпуса.

Корпусом резервуара 7 может быть, например, бочка или другая емкость, удобная для потребителя, как по форме, так и по объему.

Роль преобразующего передаточного механизма выполняют три подвижных звена, одно из которых 1 – входное, соединено посредством муфты 8 с валом источника привода 9, а другое звено 3 – выходное, соединено с рабочим валом 5.

Входное звено 1 и выходное 3 одинаковы по параметрам, которые характеризуются углом скручивания $\alpha_1 = \alpha_3$ и длинами этих звеньев, т.е. $l_1 = l_3$.

Угол скручивания геометрических осей звена 1 и звена 3 можно принимать в пределах $9...55^{\circ}$.

Звенья 1 и 2 шарнирно соединены посредством звена 2, оси шарниров которого скручены под углом α_2 , принимаемым в пределах $25...90^{\circ}$. Оси шарниров (длина звена 2) расположены друг от друга на расстоянии l_2 .

Все элементы привода и звенья расположены на стойке 4, нижняя часть которой является крышкой резервуара 7, которая крепится к нему болтовым соединением.

В стойке 4 шарнирно расположены валы звеньев 1 и 3, оси валов расположены, так же как и оси звена 2, т.е. на расстоянии l_4 и под углом α_4 .

Параметры звеньев 1,3 и параметры звена 2 и стойки 4 связаны соотношением:

$$l_1/l_2 = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2.$$

Изготовить конструкцию мешалки можно в условиях мастерских, где имеются токарный, фрезерный станки и сварочный аппарат. Валы изготавливаются по обычной технологии на токарном станке, звенья 1, 2, 3 на фрезерном станке, у которых стол и фрезерная головка могут устанавливаться под разными углами.

При изготовлении стойки, где шарнирно располагаются валы звеньев 1 и 2 поступают следующим образом. Сначала на токарном станке изготавливают два стакана с припуском под расточку под подшипники, затем их приваривают с пластинам-ребрам под углом α_2 на расстоянии l_4 . Затем закрепляют заготовку на столе фрезерного станка, обрабатывают торцовые стороны у стаканов и растачивают в них отверстия под диаметры наружного кольца подшипников.

Фото изготовленной лабораторной мешалки изображено на рис. 2. Устройство имеет следующие параметры: угол $\alpha_2 = \alpha_4 = 45^{\circ}$, $l_2 = l_4 = 200$ мм, $\alpha_1 = \alpha_3 = 20^{\circ}$, $l_1 = l_3 = 96,74$ мм.

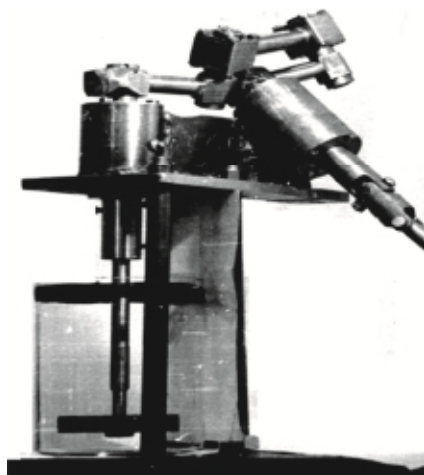


Рис. 2. Фото лабораторной мешалки

При работе мешалки от мотор-редуктора 9 вращение передается входному звену 1, звену 2 и выходному звену 3 вместе с закрепленным рабочим валом 5 с лопастями 6. За счет особого расположения шарниров передаточных звеньев выходное звено с рабочим валом имеют переменную скорость, определяемую выражением:

$$w_3 = \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \varphi} w, \quad (1)$$

где φ – угол поворота входного звена 1;

ω – угловая скорость входного звена 1 (вала источника привода).

При угле поворота $\varphi = 0^{\circ}$ входного звена 1, будет максимальное значение скорости:

$$w_3 = \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_1 \sin \alpha_2} w. \quad (2)$$

При угле поворота, равном 180° , минимальное значение:

$$w_3 = \frac{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_2} w. \quad (3)$$

Неравномерность вращения рабочего вала с лопастями определяется

коэффициентом δ , равным:

$$d = \pm 2 \frac{\sin a_1 \sin a_2}{\cos a_2 - \cos a_1}. \quad (4)$$

Регулировать процесс смешивания можно параметрами подвижных звеньев и частотой вала источника привода.

Назначать параметры устройства можно различными вариантами. Например, назначим угол $\alpha_4 = \alpha_2 = 45^\circ$, $l_4 = l_2 = 200$ мм, и угол $\alpha_1 = \alpha_3 = 20^\circ$, тогда недостающий параметр – длина входного и выходного звеньев определится $l_1 = l_2 \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = 200 \cdot \sin 20^\circ / \sin 45^\circ = 200 \cdot 0,3420 / 0,7071 = 96,7331$ мм.

Коэффициент неравномерности движения определится по формуле (4):

$$d = \pm 2 \frac{\sin a_1 \sin a_2}{\cos a_2 - \cos a_1} = \pm 2 \frac{\sin 20^\circ \sin 45^\circ}{\cos 45^\circ - \cos 20^\circ} = \pm 2 \frac{0,342 \times 0,7071}{0,7071 - 0,9396} = \pm 2 \frac{0,2418}{-0,2325} = 2,08.$$

В качестве второго варианта исполнения примем $\alpha_4 = \alpha_2 = 45^\circ$, $l_4 = l_2 = 200$ мм и коэффициент неравномерности $\delta = 2,08$, тогда недостающий угол $\alpha_1 = \alpha_3$ определится формулой:

$$a_1 = \arccos \frac{d^2 \cos a_2 \pm 2 \sin^2 a_2 \sqrt{4 + d^2}}{d^2 + 4 \sin^2 a_2} = \arccos \frac{2,08^2 \cos 45^\circ \pm 2 \sin^2 45^\circ \sqrt{4 + 2,08^2}}{2,08^2 + 4 \sin^2 45^\circ} = 20,03^\circ.$$

А длина $l_1 = l_3$ входного и выходного звеньев определится из формулы взаимосвязи $l_1 = l_2 \sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = 200 \cdot \sin 20,03^\circ / \sin 45^\circ = 200 \cdot 0,342 / 0,7071 = 96,73$ мм.

В такой последовательности определяются параметры и для других производственных размеров аппаратов с мешалкой этого типа.

Аппарат с мешалкой, у которой звенья передаточного механизма одновременно выполняют и функцию рабочих органов, показан на рис. 3.

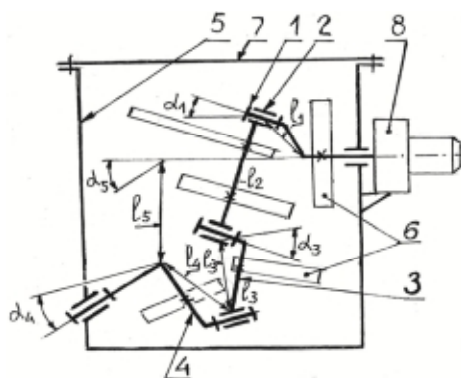


Рис. 3. Схема аппарата с мешалкой

Она включает корпус – резервуар 5 с крышкой 7, закрепленной болтовым соединением. Внутри корпуса размещены четыре подвижных звена: входное 1, выходное 4, и два промежуточных звена 2 и 3. При этом звенья между собой соединены вращательными шарнирами, а входное звено 1 и выходное 4 также шарнирно соединены с корпусом 5 [7].

На всех четырех звеньях закреплены рабочие лопасти 6 в самых разных сочетаниях и разной геометрической формы.

Источник привода (мотор-редуктор) 8 закреплен на внешней стороне корпуса 5.

У всех подвижных звеньев разные угловые и линейные параметры. Так, у входного звена 1 оси шарниров скручены под углом α_1 , и расположены оси на длине l_1 . Угол α_1 может принимать значение от 10 до 60° .

Выходное звено 4 имеет угол α_4 и длину l_4 . Параметры входного и выходного звеньев связаны соотношением $l_1 / l_4 = \sin \alpha_1 / \sin \alpha_4$.

У рабочего промежуточного звена 2 оси шарниров расположены параллельно, т.е. угол между осями равен 180 или 0° и расположены они на длине $l_2 = 2l_4$.

Второе промежуточное звено 3 имеет параметры такие же, как и у входного звена 1, т.е. $\alpha_3 = \alpha_1$, $l_3 = l_1$.

У выходного звена 4 угол скручивания $\alpha_4=180^\circ - \alpha_5$ и длина равна $\ell_4= \ell_5$, а угол α_5 есть угол между осями валов входного 1 и выходного 4 звеньев, при этом $\alpha_5 > \alpha_1$, а оси валов расположены на расстоянии ℓ_5 . Расстояние ℓ_5 и угол α_5 назначают в соответствии с высотой и диаметром корпуса емкости 5.

При работе мешалки вращение от источника привода 8 передается входному звену 1, промежуточным звеньям 2 и 3 и выходному звену 4, в результате чего все четыре звена вместе с рабочими лопастями 6 охватывают движением весь объем емкости 5. Так как каждое звено имеет свой закон сложного движения с неравномерными скоростями, то жидкости получают одновременно сильное воздействие от лопастей с дополнительным инерционным силовым импульсом от их переменной скорости, интенсифицируя процесс перемешивания любых жидкостей, в том числе вязких.

Данные типы аппаратов с мешалкой обеспечивают наибольшую степень интенсификации процесса перемешивания жидкостей.

Конкретные параметры мешалки для корпуса емкости 5 диаметром 700 мм и высотой – 1000 мм можно принять следующие: угловые и линейные размеры входного звена 1 и промежуточного звена 3- $\alpha_3=\alpha_1=25^\circ$ и $\ell_3= \ell_1=146,39$ мм; промежуточного звена 2 и выходного звена 4- $\ell_2=2\ell_4=2\cdot 300=600$ мм, $\alpha_2=0^\circ$ или 180° , $\alpha_4=180^\circ-\alpha_5=180^\circ-60^\circ=120^\circ$, $\ell_4=300$ мм.

Для конструирования аппаратов с мешалкой можно рекомендовать другие пространственные механизмы с вращательными шарнирами [8, 9, 10, 11].

Модель перемешивания в аппаратах с мешалкой

Как было отмечено, большая часть аппаратов с мешалкой работают при постоянной угловой скорости рабочих органов, процесс смесеобразования в них достаточно изучен как отечественными, так и зарубежными учеными. Известно много математических моделей, описывающие разные процессы [12], но практически нет исследований смешения при пространственном нестационарном режиме работы.

Приведем известные из литературы модели, используемые учеными для характеристики процесса при стационарном режиме. Многие исследователи считают смешивание процессом диффузионным. Такой процесс смешения записывают в виде простого уравнения:

$$\theta=1-e^{-kt}, \quad (5)$$

где θ – степень однородности смеси;

k – обобщенный коэффициент, учитывающий влияние на процесс различных факторов (физические свойства компонентов, конструктивные и технологические параметры устройства);

t – время смешения.

Однако, недостатком является то, что коэффициент k учитывает влияние очень многих факторов, которые к тому же являются переменными. Поэтому теоретически определить показатель однородности и провести оптимизацию параметров устройства не представляется возможным.

Уравнение диффузии в общем случае определяется:

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2}, \quad (6)$$

где c – коэффициент контролируемого компонента;

t – время процесса;

x – расстояние до сечения;

D – коэффициент диффузии.

Из приведенных примеров моделей видно, что исследователи по-разному интерпретируют модель диффузного смешения. Кроме всего, полученные решения исходных уравнений обычно представлены в виде рядов, что не создает удобства использования и не позволяет сделать наглядным выводы по процессу.

В предложенных нами устройствах перемешивание идет при нестационарном режиме, т.е. рабочий орган имеет переменную угловую скорость. При таком режиме смешение компонентов будет осуществляться с дополнительными инерционными воздействиями, переменными, как по величине, так и по направлению.

Процесс смесеобразования в пространственных устройствах нельзя отнести только к одному какому-то типу: конвекцией, диффузией, сдвигом и др. Здесь одновременно присутствуют многие признаки, в данном случае модель смешения назовем диффузионно-инерционной. Для описания процесса смешения воспользуемся уравнением диффузии в виде:

$$\frac{dC}{dt} = D\left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy_2^2} + \frac{d^2}{dz^2}\right)C, \quad (7)$$

где $C(r, t)$ – концентрация компонента в смеси (степень неоднородности смеси);
 D – коэффициент диффузии частиц.

После ряда преобразований получаем окончательно следующее выражение:

$$C(\bar{r}, t) = \frac{1}{8(\rho Dt)^{3/2}} \delta C_0(\bar{r}') \exp\left[-\frac{(\bar{r} - \bar{r}')^2}{4Dt}\right] d^3x. \quad (8)$$

По этому выражению можно определять степень неоднородности (концентрацию) смеси в любой момент времени по данному распределению в начальный момент.

Пусть при $t=0$, концентрация равна нулю во всем объеме пространства за исключением одной точки (начало координат), в которой она принимает бесконечно большое значение, но так, что полное количество компонента вещества, пропорциональное интегралу $\int C_0(\bar{r}) d^3x$, остается конечным.

Такое распределение можно представить δ – функцией:

$$C_0(\bar{r}) = m\delta(\bar{r}), \quad (9)$$

где m – масса добавленного компонента.

Интегрирование в формуле (8) сводится тогда просто к замене \bar{r}' нулем, в результате чего получается:

$$C(\bar{r}, t) = \frac{m}{8(\rho Dt)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4Dt}}. \quad (10)$$

Эту формулу можно истолковать и с несколько иной точки зрения. Пусть ℓ – характерная величина размера мешалки, например, высота корпуса. Тогда можно утверждать, что если в емкость был добавлен компонент, то время t , в течение которого концентрация его в различных точках емкости заметно выравнивается, равно:

$$t = \frac{G\ell^2}{D}, \quad (11)$$

где G' – коэффициент, определяемый типом мешалки, формой емкости и т.д.

В дальнейшем распределение контролируемого компонента определяется формулой:

$$C(t) = \frac{m}{2(\rho Dt)^{0,5}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}. \quad (12)$$

Таким образом, определяются время перемешивания, и распределение контролируемого компонента в смеси.

Заключение

1. Предложены два типа новых групп конструкций аппаратов с мешалкой, в одной группе использовано движение рабочих органов с нестационарным режимом работы. В другой группе звенья передаточных четырехзвенных, пятизвенных и шестизвенных механизмов выполняют одновременно функции рабочих органов, каждое из которых совершает сложное движение по своим законам.

2. Во всех группах аппаратов с мешалкой звенья передаточных механизмов имеют особое, пространственное расположение шарниров, в составе которых только вращательные шарниры, оформленные подшипниками скольжения или качения, которые легко изолируются от абразивной среды и имеют высокий ресурс работы.

3. Предложена диффузионно-инерционная модель процесса перемешивания в аппаратах с нестационарным режимом работы рабочих органов, которая позволяет характеризовать процесс перемешивания по концентрации контролируемого компонента и время процесса.

Список библиографических ссылок

1. Мудров А. Г. О новой группе пространственных аппаратов с мешалкой // Вестник КГАУ. № 2. 2016. С. 77–82.
2. Мудров А. Г. Пространственные механизмы с особой структурой. Казань : РИЦ «Школа», 2003. 300 с.
3. Nastase A., Vocioaca R. Utilizarea Programului AutoCAD Pentru Generarea Configuratiilor mecanismului Bennett, Simposionul national cu participare internationala Proiectarea ASistata de Calculator, Brasov. 2002. P. 237–240.
4. Chen Y., Baker E. J. Using a Bennett linkage as a connector between other Bennett loops, Proc. IMechE. Vol. 219. 2004. P. 177–185.
5. Perez A., McCarthy J. M. Dimensional Synthesis of Bennett Linkages, Transactions of the ASME. Vol. 125. 2003. P. 98–104.
6. Устройство для перемешивания жидкостей : пат.2633902. Рос. Федерация. № 2016126833 ; заявл. 04.07.2016 ; опубл. 19.10.2017, Бюл. № 29.
7. Мешалка для вязких жидкостей : пат. 2663586. Рос. Федерация. № 2016135499 ; заявл. 31.08.2016 ; опубл. 13.10.2017, Бюл. № 29.
8. Зиганшин И. И., Мудров А. Г. Функции механизма Беннетта // Техника и технология транспорта: научный Интернет-журнал. 2017. № 2 (3). С. 1. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/№3-11T217.pdf>.
9. Мудров А. Г. Механизм Беннетта и использование его в технике. Казань : КГСХА, 1999. 80 с.
10. Мудров А. Г. Способ и устройство для приготовления цветного бетона // Известия КГАСУ. № 4 (38). 2016. С. 444–450.
11. Мудров А. Г. Способы интенсификации процессов в строительных технологиях // Известия КГАСУ. № 2 (36). 2016. С. 233–240.
12. Барышева О. Б., Хабибуллин Р. Р., Вагизов А. З. Математическая модель расчета химически неравновесного состава для утилизации твердых бытовых отходов // Известия КГАСУ. № 1 (39). 2017. С. 166–172.

Mudrov Alexander Grigoryevich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: Alexmudrov42@rambler.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Design and model mixing in the apparatus with stirrer**Abstract**

Problem statement. Existing apparatus with a stirrer operate in a stationary mode with a large expenditure of time and energy, with insufficient homogeneity of the mixture. Reasons: the presence of zones in the body, where there is no or minimal movement of the mixed materials, a weak effect of the working organs. The aim of the study was to create devices that lacked the disadvantages of known apparatuses with a stirrer, to develop a model for mixing liquid mixtures.

Results. New spatial apparatuses with a stirrer with angular variable rotation and with different laws of motion of working organs are created, the designs of which are protected by patents for inventions. The devices allow to simplify the design and significantly intensify the process of mixture formation in all technical and operational parameters. A diffusion-inertial mixing model is proposed that characterizes the concentration of the controlled component and the time of the process.

Conclusions. The significance of the obtained results for mixing construction equipment is to create different groups of agitator devices that significantly reduce the mixing time of various materials, prepare mixtures of high uniformity, are simple in construction, reliable and have a high service life.

Keywords: variable angular velocity, mixing, rotational joints of spatial units with a stirrer, a model of mixing materials.

References

1. Mudrov A. G. About a new group of spatial units with mixer // Vestnik KGAU. № 2. 2016. P. 77–82.
2. Mudrov A. G. Spatial mechanisms with a special structure. Kazan : RIC «Shkola», 2003. 300 p.
3. Nastase A., Bocioaca R. Utilizarea AutoCAD Programului Pentru Generarea Configuratiilor mecanismului Bennett, Simposionul national cu participare internationala PROiectarea ASistata de Calculator, Brasov. 2002. P. 237–240.
4. Chen Y., Baker E. J. Using a Bennett linkage as a connector between other Bennett loops, Proc. IMechE. Vol. 219. 2004. P. 177–185.
5. Perez A., McCarthy J. M. Dimensional Synthesis of Bennett Linkages, Transactions of the ASME. Vol. 125. 2003. P. 98–104.
6. Device for mixing liquids : pat. 2633902. Rus. Federation. № 2016126833 ; Appl. 04.07.2016 ; publ. 19.10.2017, Bull. № 29.
7. Mixer for viscous liquids : pat. 2663586. Rus. Federation. № 2016135499 ; Appl. 31.08.2016 ; publ. 13.10.2017, Bull. № 29.
8. Ziganshin I. I., Mudrov A. G. Functions of the mechanism: Bennett // Technics and technology transport: a scientific Internet-journal. 2017. № 2 (3) P. 1. URL: <http://transport-kgasu.EN/files/no 3-11T217.pdf>.
9. Mudrov A. G. Bennett Mechanism and use it in the technique. Kazan : KGSKHA, 1999. 80 p.
10. Mudrov A. G. Method and device for the preparation of colored concrete // Izvestiya KGASU. № 4 (38). 2016. P. 444–450.
11. Mudrov A. G. Ways of intensification of processes of construction technologies // Izvestiya KGASU. № 2 (36). 2016. P. 233–240.
12. Barysheva O. B., Khabibullin R. R., Vagizov Z. A. Mathematical model of calculation of chemically non-equilibrium composition for disposal of solid waste // Izvestiya KGASU. № 1 (39). 2017. P. 166–172.