

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПОДГОТОВКИ СМЕСИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ С УСТАНОВЛЕННЫМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

*Ханин С.И., Воронов В.П., Кикин Н.О., Мордовская О.С.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород*

**Ключевые слова:** время подготовки, качество, ключевой компонент, математическое описание.

**Аннотация.** В промышленности строительных материалов распространены горизонтальные лопастные смесители, применяемые для подготовки пластичных и сухих смесей. К перспективным направлениям их совершенствования относятся повышение производительности и качества подготовки смеси. Рассмотрена конструкция смесителя с установленными перед рабочими поверхностями лопастей стержневыми элементами цилиндрической формы, позволяющая повысить качество смеси, уменьшить время на ее подготовку. Разработано математическое описание, позволяющее определить время смешивания, необходимое для перехода двухкомпонентной смеси в состояние, при котором концентрация ключевого компонента достигает задаваемого значения во всем объеме корпуса смесителя как с установленными перед рабочими поверхностями лопастей стержневыми элементами, так и в случае их отсутствия. С его использованием на примере двухвального лопастного смесителя промышленного типоразмера проведены исследования зависимости времени подготовки цементно-песчаной смеси от радиуса стержневых элементов, частоты вращения лопастных валов, угла установки лопастей в областях их рабочих значений. Установлено влияние на время подготовки смеси этих параметров. В результате сравнения времени подготовки смеси в этом смесителе, при его исполнении как с расположенными перед рабочими поверхностями лопастей стержневыми элементами, так и в случае их отсутствия, установлено уменьшение этого показателя при установке стержневых элементов.

## **DETERMINING THE MIXTURE PREPARATION TIME IN A HORIZONTAL PADDLE MIXER WITH INSTALLED CYLINDRICAL ROD ELEMENTS**

*Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S.*

*Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod*

**Keywords:** preparation time, quality, key component, mathematical description.

**Abstract.** In the building materials industry, horizontal paddle mixers are widely used for the preparation of elastic material and dry mixes. Promising areas for their improvement include increasing the productivity and quality of mixture preparation. The design of the mixer with cylindrical rod elements installed in front of the working surfaces of the blades is considered, which makes it possible to improve the quality of the mixture and reduce the time for its preparation. A mathematical description has been developed that makes it possible to determine the mixing time required for the transition of a two-component mixture to a state in which the concentration of the key component reaches a specified value in the entire volume of the mixer body, both with rod elements installed in front of the working surfaces of the blades, and in their absence. With its use, on the example of a two-shaft paddle mixer of industrial size, studies were carried out on the dependence of the cement-sand mixture preparation time on the radius of the rod elements, the rotational speed of the paddle shafts, and the angle of the blades in the areas of their operating values. The effect of these parameters on the mixture preparation time was established. As a result of comparing the preparation time of the mixture in this mixer, when it is designed both with rod elements located in front of the working surfaces of the blades, and in the case of their absence, a decrease in this indicator was found when installing rod elements.

**Введение.** Подготовка качественных смесей положена в основу многих промышленных производств. В промышленности строительных материалов для этих целей распространены смесители различных конструкций: гравитационные, роторные, бегунковые, горизонтальные лопастные и другие [1-4]. Применение того или иного вида смесителей обусловлено особенностями свойств компонентов смеси, требованиями к ее характеристикам. Горизонтальные лопастные смесители периодического и непрерывного действия преимущественно применяют для подготовки пластичных и сухих смесей [5, 6]. К перспективными направлениями их совершенствования относятся повышение

производительности и качества подготовки смеси. С этой целью авторами была предложена конструкция смесителя с установленными перед рабочими поверхностями лопастей стержневых элементов цилиндрической формы [7]. При установке цилиндрических стержней перед рабочими поверхностями лопастей происходит увеличение площади воздействия рабочих органов на смесь, что приводит к интенсификации процесса смесеобразования. Стержневые элементы позволяют воздействовать на уплотнение из смешиваемого материала, возникающее в результате движения лопасти в сыпучей смешиваемой среде, тем самым улучшая распределение в ней компонентов [8].

Одним из основных параметров, определяющих производительность горизонтального лопастного смесителя, как периодического, так и непрерывного действия, является время, затрачиваемое на процесс перемешивания компонентов до состояния требуемой однородности. В рассматриваемом случае оно зависит от частоты вращения лопастных валов, конструктивных параметров корпуса смесителя, лопастей, стержневых элементов, характеристик смешиваемых материалов и ряда других. Определение параметров, влияющих на процесс приготовления смеси и установление их основанного на физических законах взаимосвязанного влияния позволит разработать математическое описание времени подготовки смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными цилиндрическими стержневыми элементами.

С этой целью среди большого числа математических описаний процесса смешивания [9-11], была выбрана и использована диффузионная модель Фоккера-Планка, которая, по нашему мнению, позволяет наиболее точно описывать процесс гомогенизации сухих компонентов [12-14].

**Материалы и методы исследования.** В работе [8] установлено, что в горизонтальном лопастном смесителе с установленными цилиндрическими стержнями изменение концентрации ключевого компонента двухкомпонентной сухой смеси определяется при помощи выражения:

$$C(t, r) = C_k - (C_k - C_0) \cdot \exp\left(-\frac{(k_{uu} \cdot S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_u \cdot h)}{R_k^2} \cdot \psi_1^2 \cdot \omega \cdot t\right) \cdot \frac{J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{J_0\left(\frac{R_6}{R_k} \cdot \psi_1\right)}, \quad (1)$$

где  $C_k$  – конечная концентрация ключевого компонента при идеальном смешивании;  $C_0$  – начальная концентрация ключевого компонента;  $r$  – расстояния от оси вращения лопастного вала, м;  $S$  – площадь рабочей поверхности лопасти, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол установки лопасти к плоскости, перпендикулярной продольной оси валов (плоскость вращения), рад;  $R_u$  – радиус цилиндрического стержня, установленного перед лопастью, м;  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка [15];  $h$  – высота цилиндрического стержня, установленного перед лопастью м;  $\omega$  – угловая частота вращения лопастного вала, рад/с;  $R_k$  – радиус внутренней цилиндрической части корпуса смесителя, м;  $R_6$  – радиус лопастного вала, м;  $t$  – время воздействия лопасти на смешиваемый материал, с;  $k_{uu}$  – коэффициент, учитывающий шаг установки лопастей;  $\psi_1$  – первый корень функции Бесселя, численно равный 2,4048.

На рисунке 1 представлена расчетная схема к математическому описанию времени, необходимого для подготовки двухкомпонентной смеси в горизонтальном двухвальном смесителе с установленными стержнями цилиндрической формы.

Рассмотрим исходное состояние смеси, согласно рисунку 1, когда компонент А занимает левую часть корпуса смесителя, а компонент Б – правую часть.

Время  $t_N$ , за которое лопасть совершает  $N$  полных оборотов в объеме смешиваемых компонентов с учетом коэффициента заполнения корпуса  $k_z$  смесителя, можно определить по формуле:

$$t_N = N \cdot T \cdot k_z, \quad (2)$$

где  $T$  – время полного оборота лопасти, которое с угловой частотой вращения  $\omega$  связано соотношением:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad (3)$$

Подстановка (3) в (2) дает следующее соотношение:

$$t_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_3 \cdot N}{\omega} \quad (4)$$

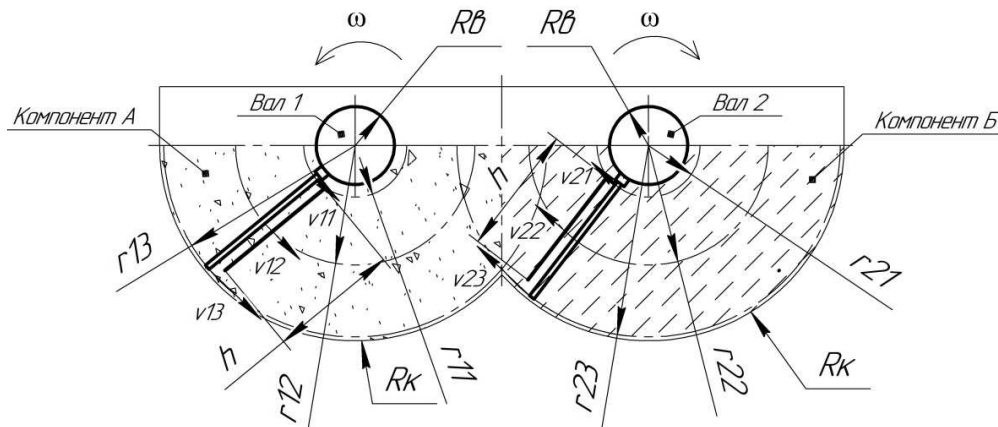


Рис. 1. Расчетная схема поперечного сечения двухвального смесителя:  $h$  – высота цилиндрических стержней;  $R_k$  – радиус днища корпуса;  $R_b$  – радиус вала;  $r$  – расстояние от оси вращения,  $r_{11}, r_{12}, r_{13}$  – переменные радиусы вращения от оси первого вала;  $r_{21}, r_{22}, r_{23}$  – переменные радиусы вращения от оси второго вала;  $v_{11}, v_{12}, v_{13}$  – линейные скорости движения частей лопастей, соответствующие радиусам вращения  $r_{11}, r_{12}, r_{13}$ ;  $v_{21}, v_{22}, v_{23}$  – линейные скорости движения частей лопастей, соответствующие радиусам вращения  $r_{21}, r_{22}, r_{23}$ ;  $\omega$  – угловая частота вращения лопастных валов

Изменение концентрации ключевого компонента сухой смеси  $C_N$  за определенное количество оборотов лопасти  $N$  можно определить по следующей формуле:

$$C_N = C_k - (C_k - C_0) \cdot \exp(-2 \cdot \pi \cdot x \cdot N \cdot k_3) \cdot \frac{J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{J_0\left(\frac{R_b}{R_k} \cdot \psi_1\right)}, \quad (5)$$

где  $C_N$  – концентрация ключевого компонента смеси за  $N$  оборотов лопасти.

В данном выражении используется следующее обозначение:

$$x = \frac{(k_{3u} \cdot S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_b \cdot h)}{R_k^2} \cdot \psi_1^2. \quad (6)$$

Примем в качестве обозначения отношение идеального значения конечной концентрации  $C_k$  к начальному значению через « $q$ »:

$$q = \frac{C_k}{C_0}. \quad (7)$$

Через  $\alpha_0$  обозначим относительное значение концентрации  $C_N$  по отношению к начальному значению  $C_k$ :

$$\alpha_0 = \frac{C_N}{C_k}. \quad (8)$$

На основании соотношения (7) и (8) получим следующее выражение:

$$C_N = \alpha_0 \cdot q \cdot C_0. \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) формула (5) примет вид:

$$\alpha_0 \cdot q = q - (q - 1) \cdot \exp(-2 \cdot \pi \cdot x \cdot N \cdot k_3) \cdot \frac{J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{J_0\left(\frac{R_b}{R_k} \cdot \psi_1\right)}, \quad (10)$$

Выражение (10) можно привести к следующему виду:

$$\frac{q \cdot (\alpha_0 - 1) \cdot J_0\left(\frac{R_6}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{(1 - q) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)} = \exp(-2 \cdot \pi \cdot x \cdot N \cdot k_3) \quad (11)$$

На основании (11) находим:

$$N = \ln\left(\frac{q \cdot (\alpha_0 - 1) \cdot J_0\left(\frac{R_6}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{(1 - q) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot x \cdot k_3}\right). \quad (12)$$

Подстановка (12) в (4) приводит к следующему результату:

$$t_N = \ln\left(\frac{q \cdot (\alpha_0 - 1) \cdot J_0\left(\frac{R_6}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{(1 - q) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)} \cdot \frac{1}{x \cdot \omega}\right). \quad (13)$$

**Результаты.** Рассмотрим определение времени смешивания, необходимого для получения значений концентрации ключевого компонента близкого к идеальным, на примере промышленного варианта двухвального смесителя ЗТФ-08, предназначенного для получения сухих строительных смесей, с помощью выражения (13). Смеситель имеет следующие технические характеристики: объем загрузки  $V=200$  л; диапазон частоты вращения лопастных валов  $n=0,5 \dots 0,8$  с<sup>-1</sup>; диапазон угла установки лопастей по отношению к плоскости вращения  $\alpha=20 \dots 30^\circ$ ; наружный радиус, описываемый лопастью,  $R_k=0,322$  м; радиус вала,  $R_B=0,02$  м; площадь рабочей поверхности лопасти  $S=0,0135$  м<sup>2</sup>; радиус установленных стержневых элементов  $R_y=2,5 \times 10^{-3}$  м; высота установленных стержневых элементов  $h=0,045$  м; заявленная установленная мощность привода по паспорту смесителя  $N_{наст.}=30 \times 10^3$  Вт. Было определено, что смеситель предназначен для получения двухкомпонентной цементно-песчаной смеси с соотношением ключевого компонента к наполнителю как 1 к 5.

С помощью программного продукта *Maple* были проведены исследования зависимости времени смешивания, необходимого для подготовки в смесителе ЗТФ-08 цементно-песчаной смеси, от его технологических и конструктивных параметров. Идеальная концентрация ключевого компонента смеси  $C_N$  должна составлять 20%.

На рисунке 2 приведены графические зависимости времени смешивания от указанных параметров, из которых следует, что с повышением частоты вращения лопастных валов время, необходимое для подготовки смеси уменьшается. Это обусловлено повышением интенсивности воздействия на нее лопастей.

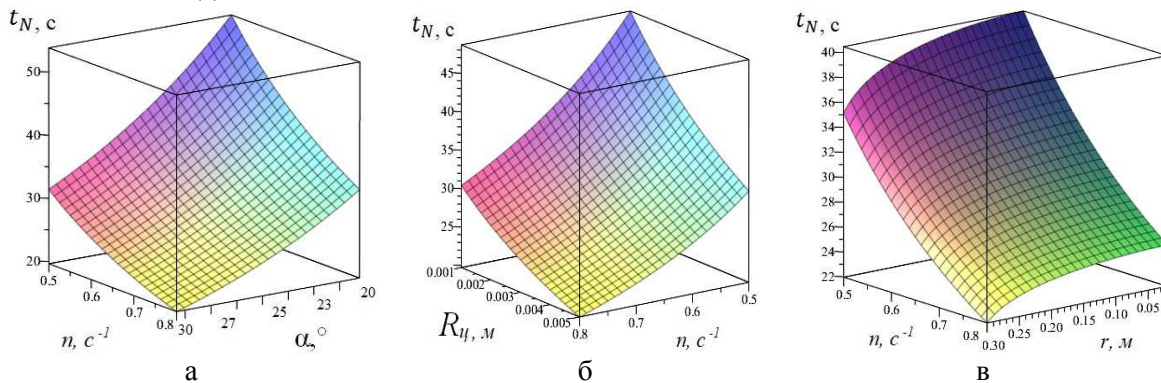


Рис. 2. Зависимость времени смешивания  $t_N$  от: а – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha$  при  $R_y=0,0025$  м и  $r=0,22$  м; б – радиуса установленных стержней  $R_y$  и частоты вращения лопастных валов  $n$  при  $\alpha=25^\circ$  и  $r=0,22$  м; в – расстояния  $r$  от оси вращения лопастного вала и частоты вращения лопастных валов  $n$  при  $\alpha=25^\circ$  и  $R_y=0,0025$  м

На рисунке 2,а показана зависимость времени смешивания от частоты вращения лопастных валов и угла установки лопасти относительно плоскости вращения. Анализируя графическую поверхность, можно констатировать, что с увеличением угла установки лопасти время, необходимое для подготовки смеси уменьшается. С увеличением угла установки лопастей увеличивается площадь проекции их контактирующих с материалом поверхностей на плоскость вращения, что приводит к более интенсивному воздействию на него лопастей.

Так, при установке лопастей к плоскости вращения под углом  $\alpha_1=20^\circ$  и изменяющихся частотах вращения лопастных валов  $n_1=0,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_2=0,65 \text{ с}^{-1}$  и  $n_3=0,8 \text{ с}^{-1}$ , время подготовки смеси принимает соответственно значения  $t_{N11}=54 \text{ с}$ ,  $t_{N12}=41 \text{ с}$ ,  $t_{N13}=34 \text{ с}$ . Значения функции изменяются на 37,0%. Когда угол установки лопасти равен  $\alpha_2=25^\circ$ , при тех же частотах вращения лопастных валов, значения времени подготовки смеси соответственно будут следующими:  $t_{N14}=40 \text{ с}$ ,  $t_{N15}=31 \text{ с}$ ,  $t_{N16}=25 \text{ с}$ . Изменение значений функции составляет 37,5%. При максимальном значении угла установки лопасти  $\alpha_3=30^\circ$  и принятых частотах вращения лопастных валов, время подготовки смеси соответственно примет значения  $t_{N17}=31 \text{ с}$ ,  $t_{N18}=24 \text{ с}$ ,  $t_{N19}=19 \text{ с}$ . Значения функции изменяются на 38,7%.

На рисунке 2,б приведены зависимости времени подготовки смеси от частоты вращения лопастных валов и радиуса установленных стержневых элементов цилиндрической формы перед рабочей поверхностью лопасти. Анализируя графическую поверхность, можно сделать вывод, что при увеличении радиуса установленных стержней цилиндрической формы, время смешивания уменьшается. Это можно объяснить увеличением площади контакта стержневых элементов со смешиваемым материалом, повышающим зону их воздействия на него.

Так при радиусе стержневых элементов  $R_{u1}=0,001 \text{ м}$  и варьируемых частотах вращения лопастных валов  $n_1=0,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_2=0,65 \text{ с}^{-1}$  и  $n_3=0,8 \text{ с}^{-1}$ , время подготовки смеси принимает соответственно значения  $t_{N21}=49 \text{ с}$ ,  $t_{N22}=37 \text{ с}$  и  $t_{N23}=31 \text{ с}$ . Изменение значений функции составляет 36,7%. При увеличении радиуса установленных стержневых элементов до  $R_{u2}=0,0025 \text{ м}$  и выбранных значений частоты вращения лопастных валов, время смешивания примет соответственно значения:  $t_{N24}=41 \text{ с}$ ,  $t_{N25}=31 \text{ с}$ ,  $t_{N26}=25 \text{ с}$ . Значения функции изменяются на 39,0%. При максимальном радиусе установленных стержней из исследуемого диапазона  $R_{u3}=0,005 \text{ м}$  и вышеуказанных значениях частоты вращения лопастных валов время смешивания изменяется соответственно на значения  $t_{N27}=32 \text{ с}$ ,  $t_{N28}=24 \text{ с}$ ,  $t_{N29}=20 \text{ с}$ . Изменение значений функции составляет 37,5%.

На рисунке 2,в показана зависимость времени смешивания от частоты вращения лопастных валов и расстояния от оси их вращения  $r$ . При увеличении расстояния  $r$  от оси вращения валов, процесс гомогенизации происходит быстрее. Так при частоте вращения  $n_1=0,5 \text{ с}^{-1}$  и варьируемых значениях этого параметра  $r_1=0,02 \text{ м}$ ,  $r_2=0,15 \text{ м}$  и  $r_3=0,3 \text{ м}$ , время смешивания принимает соответственно значения  $t_{N31}=40 \text{ с}$ ,  $t_{N32}=39 \text{ с}$ ,  $t_{N33}=35 \text{ с}$ . Изменение значений функции составляет 12,5%. При повышении частоты вращения лопастных валов до  $n_2=0,65 \text{ с}^{-1}$  и тех же значениях расстояния от оси вращения, время смешивания принимает соответственно следующие значения:  $t_{N34}=31 \text{ с}$ ,  $t_{N35}=30 \text{ с}$ ,  $t_{N36}=27 \text{ с}$ . Изменение значений функции составляет 12,9%. При рассматриваемой максимальной частоте вращения валов  $n_3=0,8 \text{ с}^{-1}$  и выбранных значениях расстояния от оси вращения, время смешивания соответственно примет значения  $t_{N37}=25 \text{ с}$ ,  $t_{N38}=24 \text{ с}$ ,  $t_{N39}=22 \text{ с}$ . Изменение значений функции составляет 12,0%. Изменение с максимального значения времени подготовки смеси  $t_{N31}$  до минимального  $t_{N39}$  составляет 45,0%.

При вращении лопастных валов линейные скорости частей поверхностей лопастей  $v_{11}$ ,  $v_{12}$ ,  $v_{13}$  и  $v_{21}$ ,  $v_{22}$ ,  $v_{23}$ , соответственно удаленные от продольных осей валов 1 и 2 на величины радиусов  $r_{11}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_{13}$  и  $r_{21}$ ,  $r_{22}$ ,  $r_{23}$  будут увеличиваться по мере удаления от этих продольных осей (рис. 1). Максимальные линейные скорости  $v_{13}$  и  $v_{23}$  будут возникать при расстоянии  $r_{13}$  и  $r_{23}$  от осей вращения валов на соответствующих лопастях, а минимальные скорости  $v_{11}$  и  $v_{21}$  – при  $r_{11}$  и  $r_{21}$ , соответственно. Поэтому интенсивность воздействия частей лопастей и стержней на смешиваемые компоненты будет увеличиваться при их удалении от продольных осей соответствующих валов в связи с ростом линейных скоростей. Следовательно, можно

предположить, что время, необходимое для завершения процесса смешивания и перехода частей смеси в устойчивое состояние, при удалении от осей вращения валов будет уменьшаться в зависимости от увеличения расстояния  $r$ . Так как расстояние между продольными осями валов меньше суммы радиусов  $r_{13}$  и  $r_{23}$ , ограничивающих лопасти, то в центральной части расположенного между валами промежутка на компоненты смеси осуществляется взаимное воздействие лопастей обоих валов. В этой части массообменные процессы протекают гораздо быстрее, чем в других частях корпуса смесителя. Исходя из выше сказанного, время приготовления смеси должно определяться завершенностью процесса смешивания на участках, минимально удаленных от продольных осей вращения валов на величину радиусов  $r_{11}$  и  $r_{21}$ . Когда концентрация ключевого компонента будет иметь наиболее оптимальное значение в местах минимальных расстояниях от осей вращения валов, можно будет сделать вывод, что процесс смешивания завершен во всем объеме корпуса смесителя.

Максимальное значение времени подготовки смеси в смесителе с установленными стержневыми элементами ( $r_1=0,02$ ) составляет  $t_{N1\max}=t_{N11}=54$  с при  $n_1=0,5$  с<sup>-1</sup>,  $\alpha_1=20^\circ$ ; минимальное –  $t_{N1\min}=t_{N19}=19$  с при  $n_3=0,8$  с<sup>-1</sup>,  $\alpha_3=30^\circ$ . Выбор частоты вращения валов  $n$  и угла установки лопастей  $\alpha$  зависит от определяющего завершения процесса смешивания значения концентрации ключевого компонента смеси  $C_N$ .

Предложенная математическая модель также позволяет определить время подготовки смеси для двухвального лопастного смесителя без установленных стержней цилиндрической формы. Для этого необходимо приравнять нулю в выражении (б) один из параметров: высоту цилиндрического стержня  $h$  или его радиус  $R_{\text{ш}}$ .

Графические зависимости времени подготовки цементно-песчаной смеси в двухвальном смесителе ЗТФ-08, при варианте исполнения без стержневых элементов, от угла установки лопасти  $\alpha$ , частоты вращения  $n$  и расстояния от оси вращения  $r$  приведены на рисунке 3. Характер поведения функции аналогичен ранее рассмотренной функциональной зависимости для смесителя с установленными стержневыми элементами.

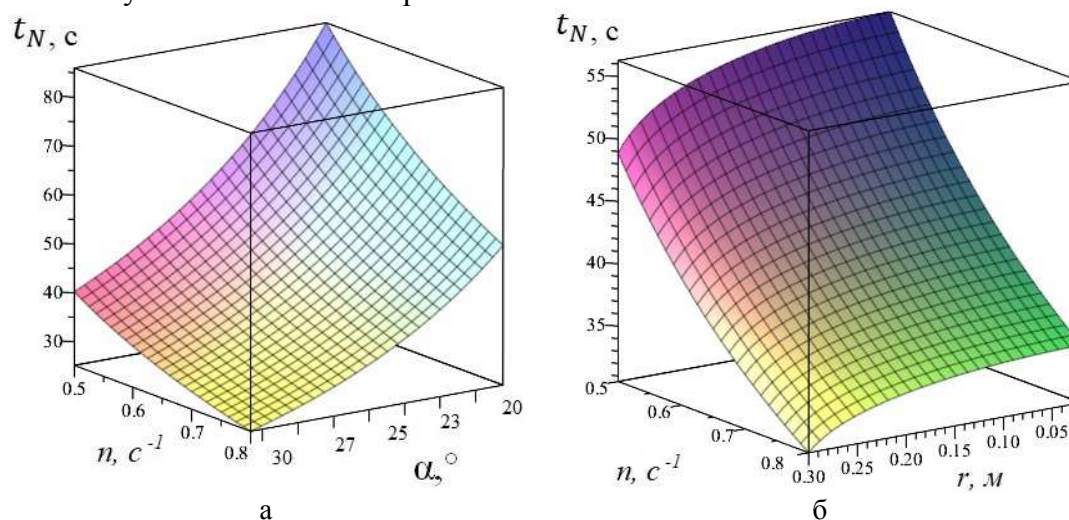


Рис. 3. Зависимость времени  $t_N$  подготовки смеси в смесителе без стержневых элементов от: а – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha$  ( $r=0,02$  м); б – расстояния от оси вращения вала  $r$  и частоты вращения лопастных валов  $n$  при  $\alpha=25^\circ$

При одинаковых с рассмотренными ранее диапазонами значений параметров  $\alpha=20\dots30^\circ$ ,  $n=0,5\dots0,8$  с<sup>-1</sup> и  $r=0,02\dots0,3$  м максимальное значение времени подготовки смеси в смесителе без стержневых элементов  $t_{N4\max}=86$  с при  $n_1=0,5$  с<sup>-1</sup>,  $\alpha_1=20^\circ$  и  $r_1=0,02$  м. Это на 37,2% больше максимального значения времени подготовки смеси в смесителе с установленными стержневыми элементами  $t_{N1\max}=54$  с. Минимальное значение времени подготовки смеси в смесителе без стержневых элементов  $t_{N4\min}=25$  с достигается при максимальных значениях угла установки лопасти  $\alpha_3=30^\circ$ , частоты вращения валов  $n_3=0,8$  с<sup>-1</sup> и

$r_1=0,02$ м. Это на 24,0% больше минимального времени подготовки смеси в смесителе с установленными стержневыми элементами  $t_{N1min}=19$  с. Менее продолжительное время подготовки смеси в разработанной конструкции смесителя до состояния требуемой однородности обеспечивает увеличение его производительности.

### Выводы

1. Показано распространение двухвальных лопастных смесителей периодического и непрерывного принципов действия в производстве строительных материалов для подготовки пластичных и сухих смесей. Обоснована разработка математического описания времени, затрачиваемого на процесс перемешивания компонентов до состояния требуемой однородности, в конструкции лопастного смесителя с установленными перед рабочими поверхностями лопастей стержневыми элементами цилиндрической формы.

2. На основе диффузионной модели Фоккера-Планка разработано математическое описание, позволяющее определить время смешивания, необходимое для перехода двухкомпонентной смеси в состояние, при котором концентрация ключевого компонента достигает задаваемого значения во всем объеме корпуса смесителя как с установленными перед рабочими поверхностями лопастей стержневыми элементами, так и в случае их отсутствия.

3. С использованием разработанного математического описания и программного продукта *Maple* на примере двухвального смесителя ЗТФ-08 проведены исследования зависимости времени подготовки цементно-песчаной смеси с задаваемой концентрацией ключевого компонента, от его технологических и конструктивных параметров. Установлено влияние на время подготовки смеси этих параметров в областях их рабочих значений: радиуса стержневых элементов  $R_s=(1...2,5)\cdot 10^{-3}$  м, частоты вращения лопастных валов  $n=0,5...0,8$  с<sup>-1</sup>, угла установки лопастей  $\alpha=20...30^\circ$ .

4. В результате сравнения времени подготовки цементно-песчаной смеси в рассматриваемом смесителе ЗТФ-08 при его исполнении как с расположенными перед рабочими поверхностями лопастей стержневыми элементами, так и в случае их отсутствия, установлена возможность уменьшения этого показателя при установке стержневых элементов. При варьировании частоты вращения валов и угла установки лопастей в областях значений  $n=0,5...0,8$  с<sup>-1</sup> и  $\alpha=20...30^\circ$ , в зависимости от определяемого условиями производства сочетания этих параметров, уменьшение времени подготовки смеси с заданной концентрацией ключевого компонента составляет 24...37%. Менее продолжительное время подготовки смеси в разработанной конструкции смесителя обеспечивает увеличение его производительности.

### Список литературы

1. Фадин Ю.М., Шеметова О.М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2020. – №12. – С. 145-150.
2. Ascanio G. Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques // Chinese journal of Chemical Engineering, 2015, no. 23, pp. 1065-1076.
3. Ефремов И.М., Соколов А.П., Лобанов Д.В., Багаудинов И.Б. К вопросу определения времени перемешивания в роторновибрационном смесителе с оболочечным виброактиватором // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – №2. – С.32-35.
4. Коновалов В.В., Фомина М.В., Терюшков В.П., Чупшев А.В. Аналитическое обоснование длительности цикла работы смесителя периодического действия // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – №3. – С. 10-15.
5. Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Балагуров И.А., Berthiaux Н., Зайцев В.А. Теоретическое исследование влияния параметров смешивания на время смешивания и качество смеси разнородных дисперсных материалов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – №5. – С. 56-61.
6. Ганеев, Р. В. Определение времени смешивания семян с препаратами в инкрустаторе-протравливателе // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2017. – № 2(42). – С. 62-67.
7. Кикин Н.О. Интенсификация процесса смешивания в смесителе принудительного действия путем устранения уплотнения из смешиваемого материала перед лопастью // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №7. – С. 27-32. – DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-27-32.

8. Ханин С.И., Воронов В.П., Кикин Н.О., Мордовская О.С. Исследование изменения концентрации ключевого компонента сухой смеси в горизонтальном лопастном смесителе с цилиндрическими стержнями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – №2. – С. 94-101. – <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-2-94-101>.
9. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2004, no. 85, pp. 1143-1168.
10. Iddir H., Arastoopour H., Hrenya С.М. Analysis of binary and ternary granular mixture behavior using the kinetic theory approach // Powder Technology. 2005, no. 151, pp. 117-125.
11. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means. A perspective // Particuology. 2012, no. 10, pp. 397-427.
12. Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
13. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 120 с.
14. Гусев Ю.И., Карасев И.Н., Кальман-Иванов Э.Э., Макаров Ю.И., Макевнин М.П., Рассказов Н.И. Конструирование и расчет машин химических производств. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.
15. Абрамовица М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

### References

1. Fadin Yu.M., Shemetova O.M. Dry building mixes and mixing equipment for their production // Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2020, no. 12, pp. 145-150.
2. Ascanio G. Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques // Chinese journal of Chemical Engineering. 2015, no. 23, pp. 1065-1076.
3. Efremov I.M., Sokolov A.P., Lobanov D.V., Bagaudinov I.B. On the issue of determining the mixing time in a rotary-vibration mixer with a shell vibration activator // Systems. Methods. Technology. 2014, no. 2, pp. 32-35.
4. Konovalov V.V., Fomina M.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V. Analytical substantiation of the duration of the cycle of operation of a batch mixer // Proceedings of the Samara State Agricultural Academy. 2015, no. 3, pp. 10-15.
5. Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Balagurov I.A., Berthiaux H., Zaitsev V.A. Theoretical study of the influence of mixing parameters on the mixing time and the quality of a mixture of heterogeneous dispersed materials // Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University. 2018, no. 5, pp. 56-61.
6. Ganeev R.V. Determination of the mixing time of seeds with preparations in the incrustrer-treater // Bulletin of the Bashkir State Agrarian University. 2017, no. 2(42), pp. 62-67.
7. Kikin N.O. Intensification of the mixing process in a forced mixer by eliminating the compaction from the mixed material before the blade // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2020, no. 7, pp. 27-32. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-27-32.
8. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S. Investigation of the change in the concentration of the key component of the dry mixture in a horizontal paddle mixer with cylindrical rods // Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2022, no. 2, pp. 94-101. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-2-94-101>.
9. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2004, no. 85, pp. 1143-1168.
10. Iddir H., Arastoopour H., Hrenya С.М. Analysis of binary and ternary granular mixture behavior using the kinetic theory approach // Powder Technology. 2005, no. 151, pp. 117-125.
11. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means. A perspective. // Particuology. 2012, no. 10, pp. 397-427.
12. Makarov Yu.I. Apparatus for mixing bulk materials. – М.: Mechanical Engineering, 1973. – 216 p.
13. Selivanov Yu.T., Pershin V.F. Calculation and design of circulating mixers of bulk materials without internal mixing devices. – М.: Publ. house «Mechanical Engineering-1», 2004. – 120 p.
14. Gusev Yu.I., Karasev I.N., Kalman-Ivanov E.E., Makarov Yu.I., Makevnin M.P., Rasskazov N.I. – М.: Mechanical Engineering, 1985. – 408 p.
15. Abramovitsa M., Stigan I. Handbook of special functions. – М.: Science, 1979. – 832 p.

### Сведения об авторах:

### Information about authors:

|   |  |
|---|--|
| <b>Ханин Сергей Иванович</b> – доктор технических наук, профессор                               | <b>Khanin Sergei Ivanovich</b> – doctor of technical sciences, professor                               |
| <b>Воронов Виталий Павлович</b> – кандидат физико-математических наук, профессор                | <b>Voronov Vitaly Pavlovich</b> – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor |
| <b>Кикин Николай Олегович</b> – аспирант  | <b>Kikin Nikolay Olegovich</b> – postgraduate student  |
| <b>Мордовская Ольга Сергеевна</b> – кандидат технических наук, доцент<br>nikolaykikin@gmail.com | <b>Mordovskaya Olga Sergeevna</b> – candidate of technical sciences, associate professor               |

Получена 22.08.2022