

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93

<sup>1</sup>\*Ханина Е.Г., <sup>1</sup>Гуденко О.В., <sup>2</sup>Мордовская О.С., <sup>1</sup>Анциферов С.И., <sup>1</sup>Богданов В.С.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова<sup>2</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет

\*E-mail: dronovahanina@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЩЕЛЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЛОПАСТЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СУХОЙ СМЕСИ

**Аннотация.** Степень однородности распределения в смеси компонентов во многом определяет качественные характеристики приготовленного из нее продукта. Для смешивания компонентов в сухом состоянии на предприятиях различных отраслей промышленности достаточно широко распространено использование горизонтальных лопастных смесителей. В конкурентных условиях функционирования предприятий возникает необходимость разработки технических решений, позволяющих обеспечивать повышение эффективности действующего смесительного оборудования на предприятиях в условиях плановых ремонтных мероприятий. Рассмотрена возможность повышения степени однородности мелкозернистой смеси в горизонтальном лопастном смесителе при выполнении в лопастях сквозных щелевых отверстий. С использованием известного программного продукта осуществлено имитационное моделирование процессов сухого смешивания двух мелкозернистых компонентов в моделях корпуса смесителя с различными конструкциями лопастей. Для исследования процесса смешивания использован метод математического планирования эксперимента. Проведены исследования полученной регрессионной зависимости, характеризующей изменение коэффициента неоднородности двухкомпонентной сухой смеси в зависимости от количества щелевых отверстий и их ширины, установлены области рациональных значений исследуемых параметров. Осуществлено сравнение состояний смеси в корпусах смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях и без отверстий. Установлено, что при установившихся состояниях процессов смешивания смесь в модели корпуса смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях характеризуется более равномерным распределением частиц. Коэффициент неоднородности, характеризующий качество этой смеси, меньше, чем у смеси в модели корпуса с лопастями без отверстий.

**Ключевые слова:** сухая смесь, лопастной горизонтальный смеситель, щелевые отверстия, имитационное моделирование, коэффициент неоднородности.

**Введение.** На предприятиях обрабатывающей промышленности процессы смешивания различных материалов преимущественно относятся к основным технологическим процессам. Степень однородности распределения в смеси компонентов во многом определяет качественные характеристики приготовленного из нее продукта [1–3]. Это характеризует роль процесса смешивания как одного из основных технологических процессов на промышленных производствах. В зависимости от особенностей технологической переработки материалов на предприятии состояние смеси может быть жидким, пластичным и сухим. Смешивание компонентов в сухом состоянии распространено на предприятиях по производству строительных материалов, фармацевтических, пищевых, химических и многих других. Выбор машины для приготовления смеси определяется ее производительностью, количеством смешиваемых компонентов и их характеристиками, требованиями к качеству смеси и рядом других. На промышленных предприятиях, как малых, так и крупных, для пригото-

вления сухих смесей достаточно широкое распространение получили горизонтальные лопастные смесители [2, 4–7]. Они характеризуются универсальностью применения, простотой конструкции, возможностью автоматизации процесса, относительно высокой производительностью. В конкурентных условиях функционирования предприятий возникает необходимость расширения номенклатуры продуктов производства, увеличения требований к их качеству, что может обеспечиваться повышением степени однородности компонентов смеси. Промышленные горизонтальные лопастные смесители, несмотря на отмеченную простоту, являются достаточно дорогостоящими машинами, и их замена на более эффективные конструкции влечет за собой большие материальные затраты на реконструкцию смесительного комплекса и убытки, обусловленные простоем оборудования. В этой связи разработка технических решений, обеспечивающих повышение эффективности действующего смесительного оборудования в условиях плановых ремонтных мероприятий, создает предприятию конкурентные преимущества.

С целью повышения степени однородности мелкозернистой смеси предложена конструкция лопастей горизонтального смесителя со щелевыми сквозными отверстиями, продольные оси которых расположены на частях дуг концентрических окружностей, соосных продольным осям валов, на которых расположены лопасти [8]. Лопасти при вращательном движении осуществляют упорядоченное воздействие на смешиваемые материалы [9–11]. Перед промежутками между отверстиями возникают уплотнения частиц, вдавливаемые в смешиваемую среду, и перетоки через щелевые отверстия частиц, находящихся перед этими отверстиями. В этих условиях происходит эффективное смешивание мелкозернистых частиц материала. Рассматриваемое техническое решение отличается простотой исполнения в условиях плановых ремонтных мероприятий предприятия, проводимых на смесительном технологическом комплексе.

**Методы, оборудование, материалы.** Предположение об эффективности подготовки мелкозернистой смеси в смесителе рассматриваемой конструкции требует подтверждения, которое целесообразно разделить на этапы математического описания процесса смешивания компонентов, установления рациональных областей конструктивных, технологических параметров и их использования для физического моделирования процесса смешивания, а также сравнения показателей работы смесителя с лопастями традиционной конструкции и с предлагаемыми отверстиями. Выполнение указанных мероприятий является длительным и трудоемким процессом, в результате которого возможно получение отрицательного результата. Поэтому на начальном этапе предпочтительно проведение экспресс-оценки эффективности применения лопастей со сквозными щелевыми отверстиями. Для этих целей могут применяться известные методы и программные продукты, позволяющие осуществлять моделирование технологических процессов и анализ результатов [12–16].

Для имитационного моделирования процесса смешивания многокомпонентных сред применялся программный продукт EDEM, который используется при исследовании технологи-

ческих процессов [17–19]. Отличительной особенностью мелкозернистой смеси является наличие очень большого количества частиц в корпусе смесителя, которое, в зависимости от их крупности, размеров корпуса экспериментальной модели может составлять сотни тысяч штук. Это затрудняет решение задачи, требует наличие специализированных вычислительных средств и достаточно большого ресурса машинного времени, которое даже для проведения одного эксперимента исчисляется сотнями часов. Для упрощения процедуры проведения эксперимента с использованием персонального компьютера разработаны цифровые модели корпуса смесителя ограниченной длины, с установленными на валу двумя лопастями, воздействующие на смешиваемый материал в направлениях друг к другу. На первой модели лопасти имеют сквозные щелевые отверстия, которые равномерно распределены по их высоте. На второй модели лопасти выполнены без отверстий. Характеристика моделей корпуса смесителя приведена в табл. 1. Цифровая модель корпуса с лопастями, имеющими по два отверстия приведена на рис. 1.

При анализе процесса смешивания материалов могут рассматриваться различные характеризующие его параметры [20, 21, 22]. В этой работе использовался достаточно широко применяемый коэффициент неоднородности смеси  $V_c$ , который, согласно [20, 2, 3], является более предпочтительным:

$$V_c = \frac{100}{c} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (1)$$

где  $\bar{c}$  – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех рассматриваемых  $n$  пробах смеси, %;  $c_i$  – значение концентрации ключевого компонента в  $i$ -ой пробе, %;  $n$  – число проанализированных проб, шт.

Рассматривалось приготовление двухкомпонентной смеси с содержанием ключевого компонента  $c_0=20$  %. Цифровая модель корпуса смесителя с загруженными частицами в состоянии перед началом процесса смешивания показана на рис. 2. Характеристика смешиваемых частиц приведена в табл. 2.

Таблица 1

## Характеристика конструктивно-технологических параметров моделей корпусов смесителей

Параметр							
Длина корпуса, $L_k$ , м	Ширина корпуса, $H_k$ , м	Угол наклона лопастей, $\alpha_l$ , рад	Высота лопастей, $l_l$ , м	Ширина лопастей в расширенной части, $h_l$ , м	Расстояние между лопастями, $l_m$ , м	Диаметр описываемых лопастями окружностей, $D_l$ , м	Частота вращения валов, $n_v$ , $c^{-1}$
0,088	0,168	0,52	0,051	0,04	0,05	0,16	1,0

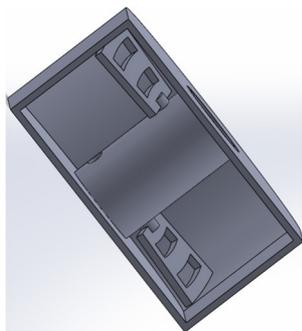


Рис. 1. Цифровая модель корпуса смесителя с выполненными отверстиями в лопастях

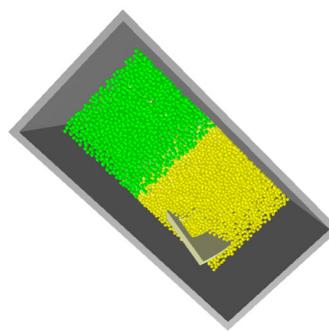


Рис. 2. Цифровая модель корпуса смесителя с загруженными частицами в состоянии перед началом процесса смешивания

Таблица 2

**Характеристика смешиваемых частиц**

Компонент	Параметр			
	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр, $d$ , $1 \times 10^{-3}$ м	Общая масса частиц, $m$ , кг	Количество частиц, $n_{ч}$ , штуки
№1	3000	3	0,96	22537
№2	2500	2,5	0,24	11577

Внутренний объем корпуса смесителя условно разбивался на  $N$  элементарных объемов (рис. 3). Минимально допустимая масса пробы, заключенная в рассматриваемом элементарном объеме, согласно [20] рассчитывалась как:

$$G_m = \frac{10^4 \pi d_k^3 \rho}{2,5c_0}, \quad (2)$$

где  $d_k$  – среднеарифметический диаметр частиц ключевого компонента, м;  $\rho$  – плотность материала частиц, кг/м<sup>3</sup>

Расчетное значение минимально допустимой массы пробы составило  $G_m = 0,025$  кг.

Для установления влияния количества щелевых отверстий  $n_{от}$  в лопастях, их ширины  $a_{от}$  на коэффициент неоднородности смеси  $V_c$  и определения их рациональных значений проведение численного эксперимента осуществлялось с использованием метода математического планирования эксперимента по ЦКОП 2<sup>2</sup> [23]. В табл. 3

приведены исследуемые факторы и уровни их варьирования. Длительность процесса смешивания устанавливалась индивидуально для каждого эксперимента в зависимости от начала установившегося его состояния.

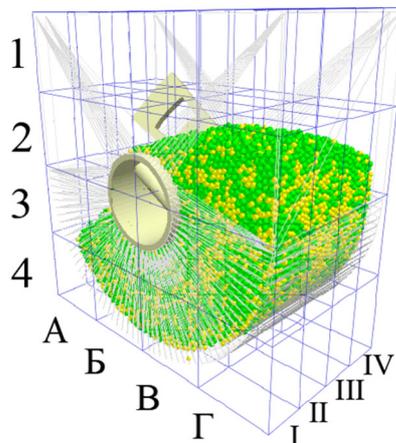


Рис. 3. Схема разделения корпуса смесителя на элементарные объемы

Таблица 3

**Уровни варьирования факторов по ЦКОП 2<sup>2</sup>**

№ п/п	Факторы		Единицы измерения	Интервал	Уровни варьирования			
	Наименование	Обозначение						
		Кодированный вид						Натуральный вид
1	Ширина отверстия	$X_1$	$a_{от}$	$1 \times 10^{-3}$ м	5	5	10	15
2	Количество отверстий	$X_2$	$n_{от}$	шт.	1	1	2	3

Расчет коэффициента неоднородности смеси по выражению (1), минимально допустимой массы пробы по выражению (2), а также коэффициентов уравнения регрессии, проверка их значимости, воспроизводимости опытов и адек-

ватности уравнения осуществлялось с использованием Microsoft Excel. Исследование, расчет уравнения регрессии, построение с его использованием графических зависимостей выполнялось в программной среде Maple.

**Основная часть.** Полученное уравнение регрессии, адекватно описывающее коэффициент неоднородности двухкомпонентной смеси для

$$V_c = 5,334 - 0,1144a_{от} - 0,924n_{от} - 0,0956a_{от} \cdot n_{от} + 0,01748a_{от}^2 + 0,472n_{от}^2. \quad (3)$$

Рассматриваемая зависимость определена при значениях ширины отверстий в интервале  $5 \text{ мм} \leq a_{от} \leq 15 \text{ мм}$  и целых значениях количества отверстий  $n_{от}=1$  шт., 2 шт., 3шт. Минимальное значение функции  $V_c=4,04 \%$  достигается при  $a_{от}=8,7 \times 10^{-3} \text{ м}$  и  $n_{от}=2$  шт., максимальное  $V_c=5,67 \%$  – при  $a_{от} = 15 \times 10^{-3} \text{ м}$  и  $n_{от}=1$  шт.

На рис. 4 приведены построенные с использованием полученного уравнения графические зависимости. Для варианта выполнения одного отверстия на каждой лопасти увеличение его ширины в рассматриваемом диапазоне значений  $a_{от}=(5...15) \times 10^{-3} \text{ м}$  приводит к возрастанию значений функции с  $V_{c11}=4,27 \%$  до  $V_{c12}=5,67 \%$ . В случае применения лопастей с двумя отверстиями увеличение их ширины с  $a_{от21}=5 \times 10^{-3} \text{ м}$  до  $a_{от22}=8,7 \times 10^{-3} \text{ м}$  приводит к уменьшению значений функции с  $V_{c21}=4,28 \%$  до  $V_{c22}=4,04 \%$ . Последующее увеличение ширины отверстий до  $a_{от23}=15 \times 10^{-3} \text{ м}$  приводит к увеличению  $V_c$  до  $V_{c23}=4,72 \%$ . При исполнении лопастей с тремя отверстиями увеличение их ширины от минимального значения  $a_{от31}=5 \times 10^{-3} \text{ м}$  приводит к уменьшению величины коэффициента неоднородности с  $V_{c31}=5,24 \%$  до  $V_{c32}=4,51 \%$ , получаемого при  $a_{от32}=11,48 \times 10^{-3} \text{ м}$ . Дальнейшее увеличение ширины отверстий приводит к росту величины  $V_c$ , которое при максимальной рассматриваемой их ширине  $a_{от31}=15 \times 10^{-3} \text{ м}$  принимает значение  $V_{c23}=4,72 \%$ . Рассмотренное сочетание количества щелевых отверстий на лопастях модели смесителя и их ширины характеризует возможность максимального уменьшения значений функции в 1,40 раза с  $V_{c12}=5,67 \%$  до  $V_{c22}=4,04 \%$ .

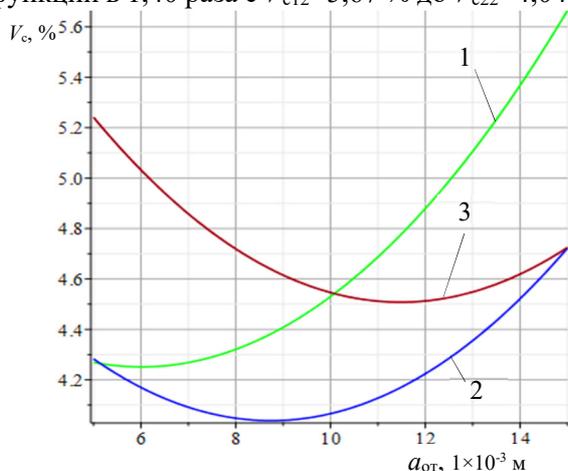


Рис. 4. Графические зависимости  $V_c$  от  $a_{от}$  при: 1 –  $n_{от}=1$  шт., 2 –  $n_{от}=2$  шт., 3 –  $n_{от}=3$  шт.

модели с лопастями, имеющими щелевые отверстия, в натуральной форме имеет вид:

При оценке эффективности процесса смешивания рассмотрена модель корпуса смесителя с лопастями, имеющими по два щелевых отверстия шириной  $a_{от} = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$ , для которой состояние смеси характеризуется коэффициентом неоднородности, достаточно близким к минимальному значению рассмотренной зависимости (1). Визуальная оценка эффективности процесса смешивания в моделях корпусов смесителей как со щелевыми отверстиями в лопастях, так и без них, устанавливалась сравнением приведенных на рис. 5 иллюстраций состояния смесей через время  $t=29 \text{ с}$  после начала процессов. Состояние смеси в корпусе смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях характеризуется более равномерным распределением частиц. Более конкретными и информативными являются значения коэффициента неоднородности смеси, получаемые на интервале времени от начала процесса смешивания до его окончания, а также на интервале, включающем время смешивания с установившимся состоянием процесса. Зависимости коэффициента неоднородности от времени смешивания для рассматриваемых моделей корпусов смесителей приведены на рис. 6. Значения  $V_c$  определялись с интервалом в 1 с начиная с первой секунды экспериментов. Для удобства описания изменений у коэффициента неоднородности смеси введены соответствующие индексы. Если у модели смесителя лопасти имеют отверстия – то обозначается как  $V_{c.от}$ , если отверстий нет –  $V_{c.б}$ . При изменении временного интервала течения процесса смешивания к указанным индексам добавляется характеризующая этот интервал цифра. Например, через одну секунду после начала процесса –  $V_{c.от1}$ ,  $V_{c.б1}$  и т. д.

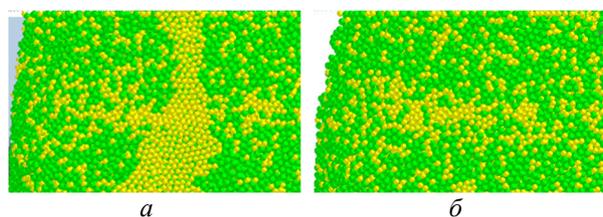
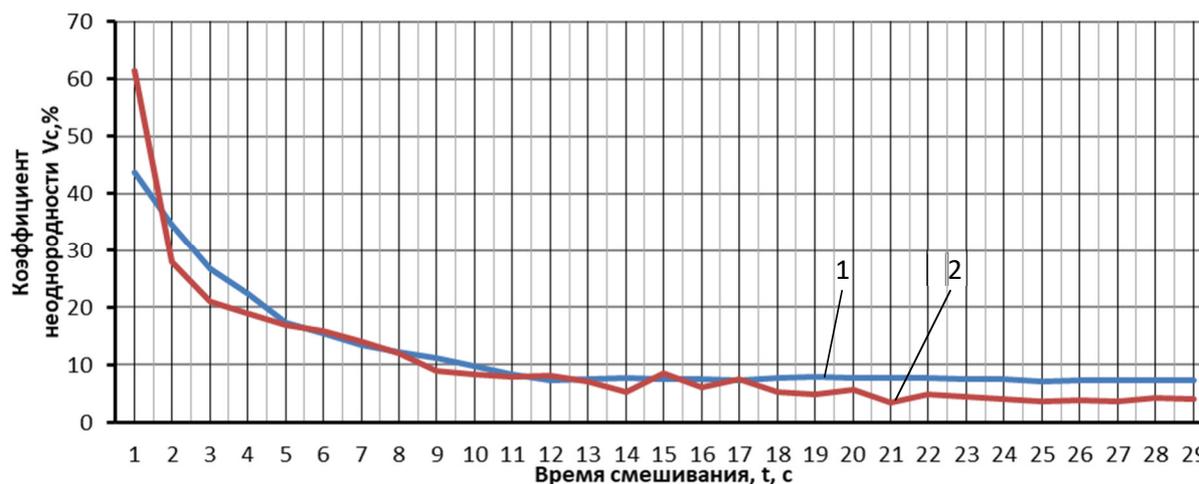


Рис. 5. Иллюстрации состояния смесей, полученных при времени смешивания  $t=29 \text{ с}$  на моделях смесителя: а – с лопастями без отверстий, б – с лопастями, имеющими по два щелевых отверстиями шириной  $a_{от}=5 \times 10^{-3} \text{ м}$

Рис. 6. Зависимости  $V_c$  от  $t$  для моделей смесителя:

1 – с лопастями без отверстий, 2 – с двумя щелевыми отверстиями шириной  $a_{от}=5 \times 10^{-3}$  м в каждой из лопастей

Для модели смесителя с лопастями, имеющими щелевые отверстия, наблюдается интенсивное изменение  $V_{c,от}$  в течение первых трех секунд до значения  $V_{c,от3}=21,29$  %. Затем, на временном интервале, включающем четырнадцатую секунду, его уменьшение происходит относительно равномерно и принимает значение  $V_{c,от14}=5,72$  %. Дальнейшее изменение  $V_{c,от}$  на временном интервале до двадцать первой секунды характеризуется неравномерностью – некоторые последующие значения  $V_{c,от}$  превышают предыдущие, причем эти превышения уменьшаются с течением времени процесса. Время  $t=21$  с можно считать завершением процесса смешивания, при котором  $V_{c,от}$  принимает значение  $V_{c,от21}=3,51$  %. На временном интервале от  $t=21$  с до  $t=29$  с наблюдаются незначительные колебания значений  $V_{c,от}$  и состояние процесса смешивания на нем можно отнести к установившемуся. Среднее значение коэффициента неоднородности на этом интервале составляет  $V_{c,от}^{cp}=4,15$  %.

Для модели смесителя с лопастями без отверстий за первую секунду процесса смешивания происходит значительное уменьшение  $V_{c,б}$  до  $V_{c,б1}=44,52$  %. Затем на временном интервале, включающем седьмую секунду, его уменьшение происходит с постепенным уменьшением разницы между предыдущим и последующим значениями и при  $t=7$  с состояние смеси характеризуется  $V_{c,б7}=13,79$  %. Дальнейшее уменьшение  $V_{c,б}$  на временном интервале, включающем двенадцатую секунду, характеризуется относительной равномерностью и при  $t=12$  с соответствует значению  $V_{c,б12}=7,56$  %. На временном интервале от  $t=13$  с до  $t=17$  с происходит медленное уменьшение  $V_{c,б}$ . Время  $t=17$  с можно считать завершением процесса смешивания, при котором  $V_{c,б}$  принимает значение  $V_{c,б17}=7,23$  %. На временном интервале от  $t=17$  с до  $t=29$  с наблюдаются незначительные колебания значений  $V_{c,б}$  и состояние

процесса смешивания можно отнести к установившемуся. Среднее значение коэффициента неоднородности на этом интервале составляет  $V_{c,б}^{cp}=7,49$  %.

Таким образом установлено, что при установившихся состояниях процессов смешивания в рассматриваемых моделях корпусов смесителя среднее значение коэффициента неоднородности смеси  $V_{c,б}^{cp}=7,49$  % в 1,8 раза превышает  $V_{c,от}^{cp}=4,15$  %. Время  $t=17$  с для перехода процесса смешивания в установившееся состояние в модели корпуса смесителя с лопастями без отверстий в 1,2 раза меньше времени  $t=21$ , необходимого для перехода процесса смешивания в установившееся состояние в модели корпуса смесителя с лопастями, имеющими по два щелевых отверстия с  $a_{от}=5 \times 10^{-3}$  м. Причем на момент времени  $t=17$  с коэффициенты неоднородности смесей в обеих рассматриваемых моделях корпуса имеют достаточно близкие значения. Последующее продолжение моделирования процессов смешивания приводит смесь в модели корпуса с лопастями без отверстий в установившееся состояние, а в модели корпуса с лопастями, имеющими щелевые отверстия, – к уменьшению значений  $V_{c,от}$ .

#### Выводы.

1. Показана целесообразность разработки технических решений, позволяющих обеспечить повышение эффективности действующего смесительного оборудования на предприятиях в условиях плановых ремонтных мероприятий. Рассмотрена возможность повышения степени однородности мелкозернистой смеси в горизонтальном лопастном смесителе при выполнении в лопастях сквозных щелевых отверстий.

2. С использованием известного программного продукта осуществлено имитационное моделирование процессов смешивания двух мелко-

зернистых компонентов в моделях корпуса смесителя с различными конструкциями лопастей. В качестве характеризующего процесс смешивания параметра рассмотрен коэффициент неоднородности  $V_c$ . Для исследования процесса смешивания использован метод математического планирования эксперимента по плану ЦКОП 2<sup>2</sup>.

3. С использованием полученной регрессионной зависимости и программной среды *Maple* проведены исследования процесса смешивания в модели корпуса смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях. В качестве варьируемых параметров рассмотрены ширина щелевых отверстий в интервале  $5 \text{ мм} \leq a_{от} \leq 15 \text{ мм}$  и количество отверстий  $n_{от}=1$  шт., 2 шт., 3шт. Рассмотренное сочетание количества щелевых отверстий на лопастях модели смесителя и их ширины характеризует возможность максимального уменьшения значений функции в 1,40 раза с  $V_{c12}=5,67 \%$  до  $V_{c22}=4,04 \%$ . Минимальное значение функции достигается при  $a_{от}=8,7 \times 10^{-3}$  м и  $n_{от}=2$  шт.

4. При оценке эффективности процессов смешивания определено, что состояние смеси в корпусе смесителя со щелевыми отверстиями в лопастях характеризует более равномерным распределением частиц. Установлено, что при установившихся состояниях процессов смешивания в модели корпуса смесителя с лопастями без отверстий среднее значение коэффициента неоднородности смеси  $V_{c.б}^{cp} = 7,49 \%$  в 1,8 раза превышает аналогичный показатель  $V_{c.ом}^{cp} = 4,15 \%$  для смеси в модели корпуса смесителя с лопастями, имеющими по два щелевых отверстия с шириной  $a_{от}=5 \times 10^{-3}$  м.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов Ю.М., Коровяков В.Ф., Денисов Г. А. Технология сухих строительных смесей. М: Издательство АСВ, 2015. 112 с.
2. Кикин Н.О. Определение коэффициента неоднородности сухой строительной смеси в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. №18. С. 67–72.
3. Шеметова О. М., Фадин Ю. М., Анциферов С. И., Загороднюк Л. Х., Аль Мамури Саад К. Ш. Проведение лабораторных исследований по определению неоднородности смеси в пневматическом смесителе // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. №17–1. С. 144–149.
4. 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.

5. Yao Y., Feng Z., Chen S., Li B. Q., Zhao L., Zhao W. A Double-Blade Mixer for Concrete with Improved Mixing Quality // New Materials and Advanced Materials. 2016. No. 41. Pp. 4809–4816.

6. Yao Y., Feng Z., Chen S. Strength of concrete reinforced using double-blade mixer // New Materials and Advanced Materials. 2013. No. 65. Pp. 787–792.

7. Ханин С.И., Воронов В.П., Кикин Н.О., Мордовская О.С. Определение времени подготовки смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными цилиндрическими стержневыми элементами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. №17–2. С. 265–272.

8. Пат.192657, Российская Федерация, МПК В28С 5/14. Лопастной смеситель материалов / Ханин С. И., Мордовская О. С., Богданов В. С., Ханина Е. Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». №2021137973; заявл. 21.12.2021; опублик. 05.05.2022, Бюл. № 13. 9 с.

9. Дёмин О.В., Першин В.Ф., Смолин Д. О. Интенсификация смешивания сыпучих материалов в лопастном смесителе // Химия и химическая технология. 2012. №8. С. 108–111.

10. Маслов А. Г., Саленко Ю. С. Исследование взаимодействия лопатки вибрационного смесителя с бетонной смесью. // Вестник ХНАДУ. 2014. № 65–66. С. 44–48.

11. Алексеев А. В., Шищенко Е. В. Исследование рабочего процесса роторного разбрасывателя сыпучих грузов с криволинейным профилем лопастей // Вестник НГИЭИ. 2018. №7. С. 29–39.

12. Rovero G., Piccinini N. Particle mixing and segregation // Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications. 2011. No. 11. Pp. 141–160.

13. Valigi M.C., Logozzo S., Landi L., Bracciosi C., Galletti L. Twin-Shaft Mixers' Mechanical Behavior Numerical Simulations of the Mix and Phases // Machines. 2019. No. 7. Pp. 39–52.

14. Valigi M.C., Gasperini I. Model-based method predicting useful life of concrete mixers // Plant Precast Technol. 2020. No. 71. Pp. 38–42.

15. Кафаров В.В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 403 с.

16. 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.

17. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer // Journal Powder Technology. 2019. No 352. Pp. 193–208.

18. Moon I., Kim J., Roh J., Lee M.S. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System // Journal Computer Aided Chemical Engineering. 2019. No 46. Pp 799–804.

19. Bogdanov V.S., Khakhalev P.A., Bogdanov N.E., Gavrunov A.J. The application of EDEM software for design parameters calculation of a ball mill lining // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No 11. Pp. 869–873.

20. Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

21. Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.

22. Веригин А.Н., Незамаев Н.А., Данильчук В.С. Машины и аппараты переработки дисперсных материалов. Основы проектирования. ЭБС Лань, 2018. 536 с.

23. Юдин Ю.В., Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие / Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.

*Информация об авторах:*

**Ханина Елена Геннадьевна**, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: dronovahanina@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Гуденко Олег Витальевич**, магистрант кафедры механического оборудования. E-mail: oleg.gudenko2014@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Мордовская Ольга Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: unique.ox@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

**Анциферов Сергей Игоревич**, кандидат технических наук, зав. кафедрой механического оборудования. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Богданов Василий Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила 03.05.2023 г.*

© Ханина Е.Г., Гуденко О.В., Мордовская О.С., Анциферов С.И., Богданов В.С., 2023

<sup>1,\*</sup>*Khanina E.G.*, <sup>1</sup>*Gudenko O.V.*, <sup>2</sup>*Mordovskaya O.S.*, <sup>1</sup>*Antsiferov S.I.*, <sup>1</sup>*Bogdanov V.S.*

<sup>1</sup>*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

<sup>2</sup>*Belgorod State National Research University.*

*\*E-mail: dronovahanina@gmail.com*

## INVESTIGATION OF INFLUENCE OF SLOTTED HOLES IN BLADES OF HORIZONTAL BLADE MIXER ON QUALITY OF PREPARATION OF TWO-COMPONENT DRY MIXTURE

**Abstract.** *The degree of uniformity of distribution in the mixture of components largely determines the qualitative characteristics of the product prepared from it. For dry mixing of components, the use of horizontal blade mixers is quite widespread in enterprises of various industries. In the competitive conditions of the operation of enterprises, it becomes necessary to develop technical solutions that allow to increase the efficiency of operating mixing equipment at enterprises in the conditions of planned repair measures. Possibility of increasing degree of homogeneity of fine-grained mixture in horizontal blade mixer when through slot holes are made in blades is considered. Using a known software product, imitated simulations of dry mixing processes of two fine-grained components in models of a mixer body with different blade designs are performed. To study the mixing process, the method of mathematical planning of the experiment is used. Researches of obtained regression dependence characterizing change of coefficient of heterogeneity of two-component dry mixture*

depending on number of slit holes and their width are carried out, areas of rational values of studied parameters are established. State of mixture in mixer housings is compared with slotted holes in blades and without holes. It has been found that with steady state mixing processes, the mixture in the mixer body model with slotted holes in the blades has a more uniform particle distribution. The heterogeneity factor characterizing the quality of this mixture is less than that of the mixture in the model of a body with blades without holes.

**Keywords:** dry mix, vane horizontal mixer, slot holes, simulation, heterogeneity factor.

## REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Korovyakov V.F., Denisov G.A. Dry mortar technology. [Tehnologiya suhih stroitel'nykh smesei]. M: Publishing house ACB, 2015, 112 p. (rus)
2. Kikin N.O. Determining the coefficient of heterogeneity of a dry construction mixture in a horizontal blade mixer with rod elements [Opredelenie koeffitsienta neodnorodnosti suhoj stroitel'noj smesi v gorizonta'lnom lopastnom smesitele so sterzhnevymi elementami]. Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023. No. 18. Pp. 67–72. (rus)
3. Shemetova O.M., Fadin Y.M., Antsiferov S.I., Zagorodnyuk L.H., Al Mamuri Saad K.Sh. Laboratory studies to determine the heterogeneity of the mixture in a pnev-matic mixer. Transport, mining and construction engineering [Provedenie laboratornykh issledovanij po opredeleniyu neodnorodnosti smesi v pnevmaticheskom smesitele]: science and production. 2022. No. 17–1. Pp. 144–149. (rus)
4. Fadin Yu.M., Shemetova O.M. Dry construction mixtures and mixing equipment for their production [Suhie stroitel'nie smesi i smesitel'noe oborudovaniya dlya ih proizvodstva]. Bulletin BGTU named after V.G. Shukhova. 2020. No. 12. Pp. 145–150. (rus)
5. Yao Y., Feng Z., Chen S., Li B.Q., Zhao L., Zhao W. A Double-Blade Mixer for Concrete with Improved Mixing Quality. New Materials and Advanced Materials. 2016. No. 41. Pp. 4809–4816.
6. Yao Y., Feng Z., Chen S. Strength of concrete reinforced using double-blade mixer. New Materials and Advanced Materials. 2013. No. 65. Pp. 787–792.
7. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O. S. Determination of the time of mixture feeding in a horizontal blade mixer with installed cylindrical rod elements [Opredelenie vremeni podgotovki smesi v gorizonta'lnom lopastnom smesitele s ustanovlennymi cilindricheskimi sterzhnevymi elementami]. Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022. No. 17–2. Pp. 265–272.
8. Pat.192657, Russian Federation, IPC B28C 5/14. Paddle mixer of materials [Lopastnoj smesitel' materialov]. Khanin S.I., Mordovskaya O. S, Bogdanov V. S, Khanina E. G.; applicant and patent holder of the Fe-deral state budgetary educational institution of higher education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova." No. 2021137973; declared. 21.12.2021; publ. 05.05.2022, Bul. No. 13. 9 p. (rus)
9. Demin O.V., Pershin V.F., Smolin D.O. Intensification of blending of loose materials in a blade mixer. Chemistry and Chemical Technology [Intensifikaciya smeshivaniya sypuchih materialov v lopastnom smesitele]. 2012. No. 8. Pp. 108–111. (rus)
10. Maslov A.G., Salenko Yu.S. Investigation of the interaction of a vibration mixer blade with a concrete mixture [Issledovanie vzaimodeistviya lopatki vibracionnogo smesitelya betonnoi smesy]. Bulletin of KhNARU. 2014. No. 65-66. Pp. 44–48. (rus)
11. Alekseev A.V., Shishchenko E.V. Research of the working process of a rotary spreader of bulk cargo with a curved blade profile [Issledovanie rabocheho protsessa rotornogo razbrasyvatelya sypuchikh gruzov s krivolineynym profilom lopastey]. Bulletin of NNSEaEU, 2018. 7. 10. Pp. 29–39. (rus)
12. Rovero G., Piccinini N. Particle mixing and segregation. Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications. 2011. No. 11. Pp. 141–160.
13. Valigi M.C., Logozzo S., Landi L., Bracciosi C., Galletti L. Twin-Shaft Mixers' Mechanical Behavior Numerical Simulations of the Mix and Phases. Machines. 2019. No. 7. Pp. 39–52.
14. Valigi M.C., Gasperini I. Model-based method predicting useful life of concrete mixers. Plant Precast Technol. 2020. No. 71. Pp. 38–42.
15. Kafarov V.V., Glebov M.B. Mathematical modeling of the main processes of chemical production [Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv]. Publishing House Yurayt, 2019. 403 p. (rus)
16. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S. Study of the change in the concentration of the key component of the dry mixture in a horizontal paddle mixer with chi-lindric rods. [Issledovanie izmeneniya koncentracii klyucheвого компонента suhoj smesi v gorizonta'lnom lopastnom smesitele s cilindricheskimi sterzhnyami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhova. 2022. No. 2. Pp. 94–101. (rus)
17. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer. Journal Powder Technology. 2019. No. 352. Pp. 193–208.

18. Moon I., Kim J., Roh J., Lee M.S. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System. *Journal Computer Aided Chemical Engineering*. 2019. No 46. Pp. 799–804.

19. Bogdanov V.S., Khakhalev P.A., Bogdanov N.E., Gavrunov A.J. The application of EDEM software for design parameters calculation of a ball mill lining. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 869–873.

20. Makarov Yu.I. Apparatus for mixing bulk materials [Apparati dlya smeshivaniya sipuchih materialov]. M.: Mechanical Engineering, 1973, 216 p. (rus)

21. Pershin V.F., Odnolko V.G., Pershina S.V. Processing of loose materials in drum-type machines

[Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa]. M.: Mashinostroenie, 2009, 220 p. (rus)

22. Verigin A.N., Nezamaev N.A., Danilchuk V.S. Machines and devices for processing dispersed materials. Basics of design [Mashiny i apparaty pererabotki dispersnykh materialov. Osnovy proektirovaniya.]. Lan', 2018, 536 p. (rus)

23. Yudin Yu.V., Maisuradze M.V., Vodolazsky F.V. Organization and mathematical development of the experiment: textbook. [Organizatsiya i matematicheskoe planirovanie eksperimenta]. Yekaterinburg: Publishing House of the Urals. un-ta, 2018. 124 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Khanina, Elena G.** Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: dronovahanina@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

**Gudenko, Oleg V.** Master student of the Department of Mechanical Equipment.

E-mail: oleg.gudenko2014@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

**Mordovskaya, Olga S.** PhD, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies. E-mail: unique.ox@gmail.com. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Victory, 85.

**Antsiferov, Sergey I.** PhD, Head of the Department of Mechanical equipment. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

**Bogdanov, Vasily S.** DSc, Professor of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

*Received 03.05.2023*

#### **Для цитирования:**

Ханина Е.Г., Гуденко О.В., Мордовская О.С., Анциферов С.И., Богданов В.С. Исследование влияния щелевых отверстий в лопастях горизонтального лопастного смесителя на качество подготовки двухкомпонентной сухой смеси // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 6. С. 85–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93

#### **For citation:**

Khanina E.G., Gudenko O.V., Mordovskaya O.S., Antsiferov S.I., Bogdanov V.S. Investigation of influence of slotted holes in blades of horizontal blade mixer on quality of preparation of two-component dry mixture. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 6. Pp. 85–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-85-93