

На правах рукописи



КИКИН НИКОЛАЙ ОЛЕГОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ  
СО СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Специальность 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы  
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».

**Научный руководитель:**

**Ханин Сергей Иванович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры механического оборудования  
БГТУ им. В. Г. Шухова

**Официальные оппоненты:**

**Минин Виталий Васильевич,**  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры транспортных и  
технологических машин Сибирского  
федерального университета

**Верлока Иван Игоревич,**  
кандидат технических наук, инженер-электроник I категории, ПАО  
«Славнефть-ЯНОС», цех КИПиА и  
систем управления №15 Участок  
ремонта аналитического оборудования  
и расходомеров №11.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

Защита состоится «31» октября 2023 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.276.03 на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ауд. ГУК 242.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте (URL: [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Kikin](https://gos_att.bstu.ru/dis/Kikin))

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ

Автореферат диссертации разослали «    » 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



И. А. Семикопченко  
к.т.н., доцент

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Получение качественных сухих смесей является важнейшим звеном технологического процесса в различных сферах народного хозяйства, как в промышленности, так и в сельском хозяйстве.

Для подготовки сухих смесей используются смесительные машины различных принципов действий и конструкций. Существуют планетарные, пневматические, роторные, бегунковые, лопастные, гравитационные типы смесителей и другие. Применение того или иного типа смесителей обуславливается физико-механическими свойствами смешиваемого материала, требованиями к её характеристикам.

Особую нишу в производстве сухих смесей занимают горизонтальные лопастные двухвальные смесители. Их использование в России и за рубежом обуславливается рядом преимуществ. Из достоинств двухвальных смесителей следует выделить большую производительность, простоту конструкции, неприхотливость в обслуживании и ремонте, а также возможность работы как в непрерывном, так и в периодическом режимах.

К основному недостатку машин данного типа следует отнести низкое интенсивное воздействие рабочих органов на смешиваемые компоненты, сказывающееся как на качественных характеристиках полученных смесей, так и приготавливаемых из них изделий.

Широкое распространение горизонтальных лопастных смесителей в отечественной промышленности и сельском хозяйстве, их имеющиеся преимущества перед другими типами смесительных машин, обуславливают необходимость внедрения новых технических решений, ориентированных на повышение однородности сухой смеси. Технические решения не только должны повысить качество приготавливаемых смесей, но и обеспечивать рациональное энергетическое потребление, быть экономически обоснованными. Это характеризует выбранное направление исследований как актуальное.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время большой вклад в изучение и развитие оборудования для получения высококачественных смесей, а также в разработку аналитических методов исследования процессов смесеобразования внесли следующие ученые: Бунин М.В., Емельянова И. А., Ефремов И. М., Капанова А. Б., Кафаров В.В., Лебедев А. Т., Лозовая С.Ю., Макаров Ю. И., Мизонов В. Е., Першин В.Ф., Севров К. П., Chiara F. Ferraris, H. Berthiaux, Klein G., Shinohara, K., Shu-San Hsiau, Strenk F., Stuart R. и другие. Труды и исследования вышеперечисленных ученых способствовали улучшению качественных характеристик процесса смешивания.

В связи с широким использованием лопастных горизонтальных смесителей и имеющимися недостатками необходимо дальнейшее конструктивно-технологическое совершенствование данного вида оборудования и повышение качества приготавливаемых смесей.

**Объект исследования** – горизонтальный лопастной смеситель.

**Предмет исследования** – процесс смешивания сухих компонентов в лопастном горизонтальном смесителе с установленными стержневыми элементами.

**Цель работы** – повышение качества подготовки мелкозернистой сухой смеси за счет конструктивного совершенствования рабочих органов горизонтального лопастного смесителя и разработка методики его расчета.

**Задачи исследований:**

1. Разработать новое техническое решение, основанное на анализе конструкций смесителей, обеспечивающее повышение качества приготавливаемой смеси в горизонтальном лопастном смесителе.

2. Получить математические выражения для определения изменения концентрации ключевого компонента, времени смешивания для достижения заданной концентрации ключевого компонента и мощности привода смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля.

3. Установить адекватность полученных математических выражений.

4. Провести экспериментальные исследования с целью оценки влияния основных факторов на изменение коэффициента неоднородности сухой смеси, времени ее приготовления, предела прочности на сжатие бетонных образцов, полученных из приготовленной смеси, а также потребляемую мощность приводом смесителя со стержневыми элементами.

5. Разработать методику расчета основных технологических и конструктивных параметров смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля.

6. Применить полученные результаты в производственных условиях.

**Научная новизна.**

1. Получено математическое выражение для определения изменения концентрации ключевого компонента в процессе смешивания в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами.

2. Получено математическое выражение, позволяющее определить время смешивания для достижения заданной концентрации ключевого компонента в смесителе со стержневыми элементами.

3. Получено математическое выражение, учитывающее влияние конструктивных параметров стержневых элементов цилиндрического профиля на потребляемую мощность привода смесителя.

4. На основе полученных математических выражений установлены закономерности изменения концентрации ключевого компонента, времени смешивания и потребляемой мощности при приготовлении цементно-песчаной смеси в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами.

5. Установлены рациональные конструктивно-технологические параметры, обеспечивающие повышение качества мелкозернистой сухой строительной смеси и уменьшение времени ее подготовки в лопастном смесителе со стержневыми элементами.

6. Получены математические выражения, в форме уравнений регрессии, адекватно описывающие изменения концентрации ключевого компонента цементно-песчаной смеси, предела прочности бетонных образцов на сжатие и мощности, потребляемой приводом двухвального лопастного смесителя периодического действия со стержневыми элементами.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке математических выражений, позволяющих определить основные конструктивно-технологические параметры горизонтального лопастного смесителя со стержневыми элементами, а также в установлении закономерностей изменения этих параметров.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке методики расчета основных технологических и конструктивных параметров смесителя со стержневыми элементами, на базе полученных математических выражений и существующих методик.

Предложено техническое решение в виде установки стержневых элементов для горизонтального лопастного смесителя, защищенное патентом РФ, обеспечивающее снижение коэффициента неоднородности смеси.

Реализовано применение результатов работы на предприятии ООО «Экохим-Инкапол». При подготовке цементно-песчаной смеси класса прочности В12,5 по ГОСТ 31358–2019, установлено снижение коэффициента неоднородности на 9,7 % и повышение предела прочности на сжатие изготовленных из нее бетонных образцов на 8,1 % по сравнению со смесителем без стержневых элементов. Это позволило сократить содержание цемента на 9,8 % при соблюдении требований к однородности смеси и прочностным характеристикам приготавливаемого из неё бетона.

**Методы исследований.** Использовались общепринятые для технических наук теоретические (идеализация, формализация), экспериментальные (наблюдение, эксперимент, сравнение) и специальные (математическое и физическое моделирование) методы исследований.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- математические выражения, позволяющие определить изменение концентрации ключевого компонента смеси, времени смешивания и мощности, потребляемой приводом двухвального смесителя со стержневыми элементами;

- результаты экспериментальных исследований изменения коэффициента неоднородности и концентрации ключевого компонента мелкозернистой цементно-песчаной смеси, приготовленной в смесителе со стержневыми элементами, предела прочности на сжатие бетонных образцов, полученных из приготовленной цементно-песчаной смеси, а также мощности, потребляемой приводом смесителя;

- инженерная методика расчета основных конструктивных и технологических параметров горизонтального лопастного смесителя со стержневыми элементами;

- конструкция двухвального лопастного смесителя со стержневыми элементами, установленными перед рабочими поверхностями лопастей, защищенная патентом РФ.

**Степень достоверности** научных положений, выводов и рекомендаций соответствует современным требованиям и обоснована использованием фундаментальных законов, точных контрольно-измерительных устройств, высокотехнологичного оборудования БГТУ им. В. Г. Шухова, согласованием результатов расчетов с данными экспериментальных исследований.

**Апробация результатов.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на X Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2018); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2018); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2020); V Международной научно-практической конференции «Машиностроение: инновационные аспекты развития», (Санкт-Петербург, 2022).

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 18 статей, в том числе 5 статей в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент РФ на полезную модель.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка литературы из 142 наименований и 4 приложений. Работа состоит из 187 страниц основного текста, включающего 51 рисунок, 18 таблиц, список литературы из 142 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введение** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** представлен анализ состояния и развития оборудования для приготовления сухих смесей. Преимущественные особенности горизонтальных лопастных смесителей способствуют их широкому распространению в промышленности. В то же время низкое интенсивное воздействие рабочих органов на смешиваемые компоненты сказывается на качественных характеристиках получаемых в них смесей, что ограничивает конкурентные преимущества перед другими типами смесителей. Анализ конструкций рабочих органов и их влияние на процесс смешивания компонентов свидетельствует о целесообразности разработки нового технического решения, обеспечивающего повышение качества приготавливаемой смеси в горизонтальном лопастном смесителе. Анализ результатов исследований процесса смешивания материалов, методик расчета основных конструктивно-технологических параметров лопастных смесителей свидетельствуют о необходимости получения математических выражений для описания рассматриваемого процесса при конструктивном совершенствовании рабочих органов и разработки, основанной на этих выражениях, методики расчета

конструктивно-технологических параметров смесителя. Определена цель научных исследований и поставлены задачи для достижения этой цели.

**Во второй главе** для повышения качества подготовки сухой смеси с учетом ее мелкозернистости разработано техническое решение в виде установки стержневых элементов перед лопастями смесителя с горизонтальным расположением валов (рисунок 1), защищенное патентом Российской Федерации на полезную модель.

Для установления конструктивных особенностей стержневых элементов и их количества проведено имитационное моделирование процесса смешивания мелкозернистой двухкомпонентной смеси при различных частотах вращения лопастного вала с использованием цифровых моделей смесителя в программной среде EDEM. Эксперименты проведены при круглой, треугольной и квадратной форме поперечного сечения стержней. В качестве характеризующих процесс смешивания параметров рассматривались коэффициент неоднородности смеси ( $V_c$ , %) и время ее приготавления ( $t$ , с). Установлено, что наиболее целесообразно использовать стержневые элементы цилиндрического профиля для достижения наименьших значений времени смешивания и коэффициента неоднородности.

На основе диффузионной модели получено математическое выражение, позволяющее определить изменение концентрации ключевого компонента:

$$C(t, r) = C_k - (C_k - C_0) \cdot \exp \left( - \frac{k_V \cdot (S \cdot \sin \alpha + 2\pi R_{\text{ш}} \cdot h)}{R_k^2} \cdot \frac{J_0 \left( \frac{R_{\text{в}}}{R_k} \cdot \psi_1 \right)}{J_0 \left( \frac{r}{R_k} \cdot \psi_1 \right)} \cdot \psi_1^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot t \right) \times \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация ключевого компонента, доли единиц;  $t$  – время смешивания, с;  $r$  – расстояние от оси вращения, м;  $C_k$  – конечное (идеальное) значение концентрации ключевого компонента смеси сыпучего материала;  $C_0$  – начальное значение концентрации ключевого компонента смеси сыпучего материала;  $k_V$  – коэффициент, учитывающий отношение объема материала, захватываемого лопастью, к полному объему материала, заключенного в зоне установки лопасти;  $S$  – площадь поверхности лопасти, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол установки лопасти относительно плоскости вращения, град;  $R_{\text{ш}}$  – радиус установленных стержневых элементов цилиндрической формы, м;  $h$  – высота стержневых элементов, м;  $R_k$  – внутренний радиус цилиндрической части корпуса смесителя, м;  $\psi_1$  – первый корень функции Бесселя  $\psi_1 = 2,4048$ ;  $n$  – частота вращения вала, с<sup>-1</sup>;  $R_{\text{в}}$  – радиус лопастного вала смесителя, м.

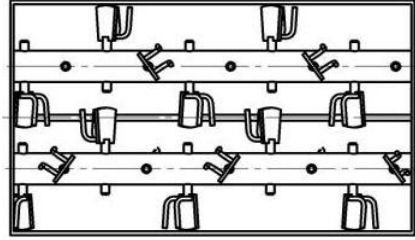


Рисунок 1. Схема рабочей камеры смесителя со стержневыми элементами

С помощью выражения (1) исследованы закономерности изменения концентрации ключевого компонента ( $C_k=0,2$ ) цементно-песчаной смеси от конструктивно-технологических параметров смесителя с объемом рабочей камеры  $V=1 \text{ м}^3$ . Графические зависимости изменения функции от конструктивно-технологических параметров смесителя приведены на рисунке 2. Установлено, что минимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{\min}=0,21$  достигается при следующих рациональных значениях конструктивно-технологических параметров лопастного смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля:  $L_{\text{л.рац.}}=0,17 \text{ м}$ ,  $b_{\text{л.рац.}}=0,13 \text{ м}$ ,  $R_{\text{ц.рац.}}=0,003 \text{ м}$ , высоты  $h_{\text{рац.}}=0,17 \text{ м}$ ,  $n_{\text{рац.}}=1,0 \text{ с}^{-1}$  и  $\alpha_{\text{рац.}}=40^\circ$ .

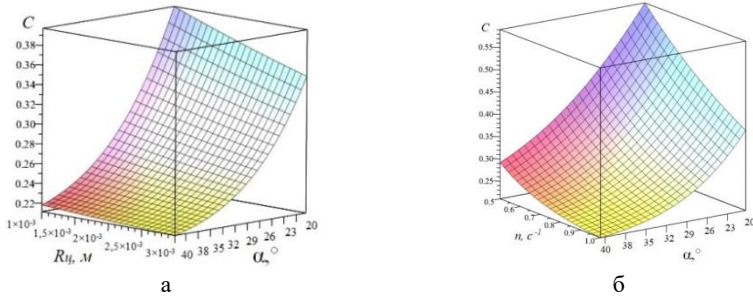


Рисунок 2. Зависимости концентрации ключевого компонента от:  
а – радиуса  $R_{\text{ц}}$  установленных стержневых элементов и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $t=20 \text{ с}$ ,  $n=0,5 \text{ с}^{-1}$ ; б – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $t=20 \text{ с}$ ,  $L_{\text{л}}=0,1 \text{ м}$ ,  $b_{\text{л}}=0,1 \text{ м}$ ,  $R_{\text{ц}}=0,0025 \text{ м}$ .

Получено математическое выражение, позволяющее определить время смешивания, необходимое для достижения заданной концентрации ключевого компонента:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{(1-q) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{q \cdot (\alpha_0 - 1) \cdot J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right)}\right)}{\frac{k_V \cdot S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot h}{R_k^2} \cdot \psi_1^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}, \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  – отношение концентрации  $C_N$  к конечному идеальному значению  $C_k$ ;  $C_N$  – концентрация ключевого компонента смеси за  $N$  оборотов лопасти.

С помощью выражения (2) исследованы закономерности изменения времени смешивания цементно-песчаной смеси, до достижения  $C_k=0,22$ , от конструктивно-технологических параметров смесителя ( $V=1 \text{ м}^3$ ). Графические зависимости изменения функции от  $R_{\text{ц}}$ ,  $n$  и  $\alpha$  приведены на рисунке 3. Установлено, что наименьшее время смешивания для получения заданной концентрации ключевого компонента  $C_k=0,22$  достигается при:  $n_{\text{рац.}}=1,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $R_{\text{ц.рац.}}=0,007 \text{ м}$ ,  $\alpha_{\text{рац.}}=40^\circ$ ,  $r_{\text{рац.}}=0,3 \text{ м}$ .

В основу математического описания мощности привода, затрачиваемой на процесс приготовления смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными стержневыми элементами, положено известное выражение:

$$P_{\text{прив}} = \frac{\lambda \cdot (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{\eta}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – общий КПД привода;  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий дополнительные энергетические потери;  $P_1, P_2, P_3, P_4$  – составляющие общей мощности  $P_{\text{общ}}$ , расходуемые, соответственно, на преодоление лобового сопротивления движению лопасти в среде сыпучих материалов, Вт; преодоление сил трения материала о поверхность лопасти, Вт; преодоление сил трения материала о стенки корпуса лопастного смесителя, Вт; преодоление сил трения материала о кронштейн крепления лопасти, Вт.

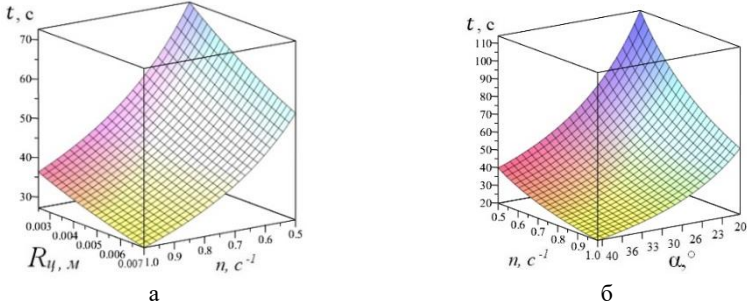


Рисунок 3. Зависимость времени смешивания от:

а – радиуса установленных стержневых элементов  $R_{ш}$  и частоты вращения лопастных валов  $n$ , при  $\alpha=30^\circ$ ; б – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $R_{ш}=0,005$  м

Составляющие общей мощности  $P_2, P_3, P_4$  описываются в существующих аналитических исследованиях и не нуждаются в уточнении. Известное описание  $P_1$  не может использоваться вследствие взаимосвязанного воздействия лопастей и расположенных перед ними стержневых элементов на смешиваемый материал. В этой связи получено математическое выражение для определения мощности  $P_{\text{л.с.}}$ , Вт; затрачиваемой на преодоление сил лобового сопротивления при вращении лопастей с установленными стержневыми элементами в сыпучей среде материала:

$$\begin{aligned} P_{\text{л.с.}} = & i \cdot \left( \frac{c_0}{4 \cdot L_{\text{л}}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot (b_{\text{л}} \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot d_0)^2 \right. \\ & \cdot ((r_0 + L_{\text{л}})^4 - r_0^4) \times \exp\left(\frac{r_0}{(b_{\text{л}} \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot d_0)}\right) \\ & \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \times \\ & \times \left( 1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{(b_{\text{л}} \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot d_0)}\right) \right) + z_{\text{ст}} \cdot \left( \frac{c_1}{4 \cdot L_{\text{л}}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_0^2 \cdot ((r_0 + L_{\text{л}})^4 - \right. \\ & \left. - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{d_0}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{d_0}\right) \right) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $i$  – количество лопастей смесителя, шт.;  $c_0$  – коэффициент сопротивления движению лопасти в воздушной среде;  $\rho$  – насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $b_{\text{л}}$  – ширина лопасти, м;  $d_0$  – диаметр устанавливаемых стержневых элементов, м;  $r_0$  – высота кронштейна лопасти, м;  $L_{\text{л}}$  – высота лопасти, м;  $t_k$  – время воздействия лопасти на сыпучий

материал, с;  $z_{\text{ст}}$  — количество установленных стержневых элементов, шт.;  $c_I$  — коэффициент сопротивления цилиндрического стержня в воздушной среде.

С использованием выражения (4) исследованы закономерности изменения  $P_{\text{л.с.}}$  от конструктивно-технологических параметров смесителя ( $V=1 \text{ м}^3$ ) при движении лопасти с установленными стержневыми элементами в цементно-песчаной смеси (рисунок 4).

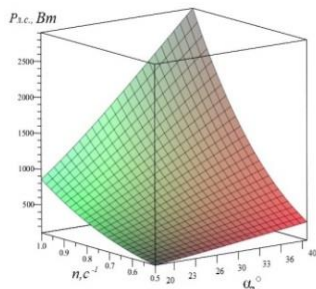


Рисунок 4. Зависимость мощности  $P_{\text{л.с.}}$  от частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $d_0=0,005 \text{ м}$

Установлено, что при изменении частоты вращения лопастных валов в диапазоне  $n=0,5 \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$  на долю  $P_{\text{л.с.}}$  в общей величине потребляемой мощности на процесс смешивания приходится около 9,4 %.

В третьей главе диссертации описаны программа проведения экспериментальных исследований, экспериментальная установка двухвального лопастного смесителя со стержневыми элементами цилиндрического профиля (рисунок 5) и размерами камеры смешивания: длиной  $L=0,5 \text{ м}$ , шириной  $B=0,29 \text{ м}$  и высотой  $H=0,17 \text{ м}$ . Приведены характеристики используемого оборудования, средств контроля измерений и методики проведения экспериментальных исследований. Представлены рецептура сухой строительной мелкозернистой строительной смеси и физико-механические характеристики входящих в её состав компонентов.



Рисунок 5. Экспериментальная установка двухвального смесителя со стержневыми элементами

В четвертой главе определены функции отклика и варьируемые факторы, а также уровни их варьирования при исследовании процесса смешивания мелкозернистой цементно-песчаной смеси с соотношением компонентов 1:4. Обоснован выбор основных факторов, которые оказывают наибольшее влияние на функции отклика, характеризующие процесс смешивания, представлены результаты экспериментальных исследований. Получены математические выражения в виде уравнений регрессии, адекватно описывающих зависимости коэффициента неоднородности  $V_c$ ; предела

прочности на сжатие бетонных балочек  $\sigma_{сж}$ ; мощности  $P_{прив.эксп.}$ , потребляемой приводом смесителя; а также концентрации ключевого компонента  $C_3$  от варьируемых параметров.

Уравнения регрессии в натуральном виде:

$$V_c = 16,641 - 6,648 \cdot n + 0,538 \cdot c - 0,758 \cdot \alpha - 2,003 \cdot n \cdot c - 0,489 \cdot n \times \alpha + 0,026 \cdot c \cdot \alpha + 12,875 \cdot n^2 + 0,071 \cdot c^2 + 0,020 \cdot \alpha^2. \quad (5)$$

$$\sigma_{сж} = -88,45 + 174,95 \cdot n + 3,02 \cdot c + 1,18 \cdot \alpha - 1,2 \cdot n \cdot c + 0,01 \cdot c \cdot \alpha - 85,95 \cdot n^2 - 0,174 \cdot c^2 - 0,02 \cdot \alpha^2. \quad (6)$$

$$P_{прив.эксп.} = 516,63 - 1022,73 \cdot n - 4,65 \cdot c - 13,56 \cdot \alpha + 16,92 \cdot n \cdot \alpha + 441,43 \cdot n^2 + 0,42 \cdot c^2 + 0,096 \cdot \alpha^2. \quad (7)$$

$$C_3 = 1,256 - 0,913 \cdot n - 0,0385 \cdot t + 0,0112 \cdot n \cdot t + 0,267 \cdot n^2 + 0,000457 \cdot t^2. \quad (8)$$

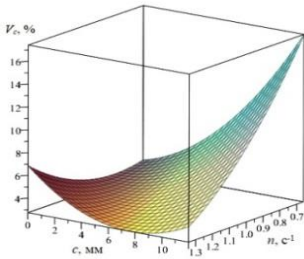


Рисунок 6. Зависимость коэффициента неоднородности от расстояния  $c$  и частоты вращения  $n$ , при  $\alpha=30^\circ$

С использованием полученных математических выражений (5)-(8) исследовано влияние рассматриваемых факторов, в виде конструктивно-технологических параметров смесителя, на изменение  $V_c$ ,  $\sigma_{сж}$  и  $P_{прив.эксп.}$ .

Установлено, что минимальное значение коэффициента неоднородности  $V_{c,min}=2,6$  % достигается при частоте вращения лопастных валов  $n=1,34$  с<sup>-1</sup>, расстоянии между стержневыми элементами и рабочими поверхностями лопастей  $c=8$  мм, угле установки лопастей от относительной плоскости вращения  $\alpha=27^\circ$  (рисунок 6).

Максимальное значение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24,9$  МПа бетонных образцов, получаемых из приготовленной смеси, достигается при частоте вращения лопастных валов  $n=0,97$  с<sup>-1</sup>, расстоянии  $c=6,3$  мм и угле  $\alpha=31,7^\circ$  (рисунок 7).

Мощность  $P_{прив.эксп.}$ , потребляемая приводом смесителя, возрастает при увеличении значений частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  (рисунок 8). Максимальное значение мощности привода  $P_{прив.мах}=425$  Вт достигается при  $n=1,34$  с<sup>-1</sup> и  $\alpha=40^\circ$ .

На рисунке 9 показаны зависимости концентрации ключевого компонента от времени смешивания  $t$  при различных значениях частоты вращения лопастных валов.

Значения функции уменьшаются при увеличении частоты вращения  $n$  и

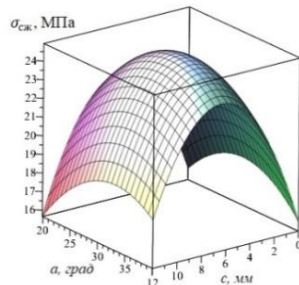


Рисунок 7. Зависимость предела прочности на сжатие бетонных образцов от расстояния  $c$  и угла  $\alpha$  при частоте вращения  $n=1$  с<sup>-1</sup>

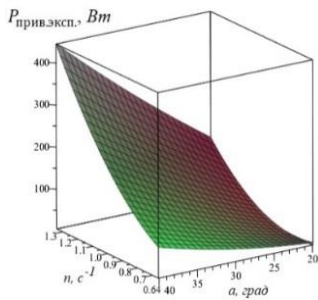


Рисунок 8. Зависимость мощности привода от частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $c=6$  мм

времени смешивания  $t$ . Процесс смешивания рассматривался завершившимся, когда значение концентрации ключевого компонента достигало величины, незначительно изменяющейся при его продолжении.

Экспериментально подтверждена адекватность разработанных математических выражений, полученных теоретическим путем, которые позволяют определить изменение концентрации ключевого компонента  $C$ , времени смешивания  $t$ , необходимого для получения заданной концентрации ключевого компонента и мощность, потребляемую приводом смесителя с установленными стержневыми элементами. Максимальное расхождение между значениями, полученными теоретически и экспериментально, составляет для:

концентрации ключевого компонента - 12,8 %; потребляемой приводом смесителя мощности - 10,5 %; времени смешивания - 12,7 %.

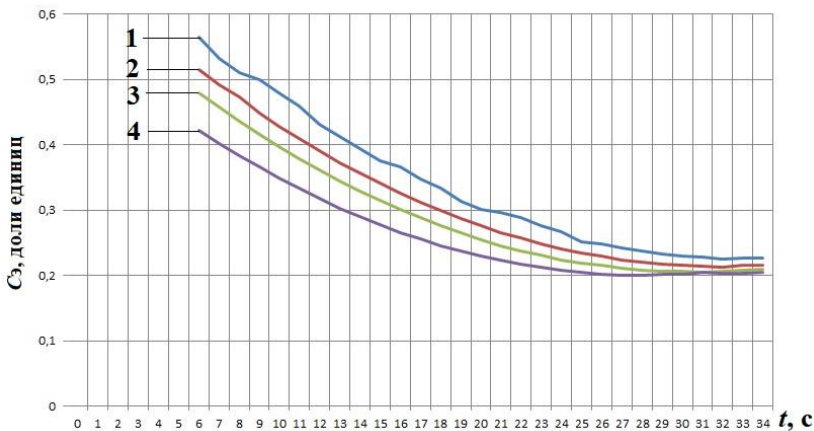


Рисунок 9. Зависимость концентрации ключевого компонента от времени смешивания при:

1 –  $n_1=0,75$  с<sup>-1</sup>; 2 –  $n_2=0,85$  с<sup>-1</sup>; 3 –  $n_3=0,95$  с<sup>-1</sup>; 4 –  $n_4=1,15$  с<sup>-1</sup>

В пятой главе представлена разработанная инженерная методика расчета конструктивно-технологических параметров горизонтального лопастного смесителя со стержневыми элементами цилиндрического профиля и приведен пример расчета смесителя с производительностью  $Q=15$  т/ч. Представлены результаты опытно-промышленных испытаний горизонтального лопастного смесителя периодического действия СГО-4 предприятия ООО «Экохим-Инкапол». В результате производственных испытаний установлено, что расположение стержневых элементов перед лопастями сме-

теля обеспечивает при подготовке цементно-песчаной смеси В12,5 уменьшение коэффициента неоднородности получаемой смеси до 9,7 % и повышение предела прочности изготовленных из нее бетонных образцов до 8,1 % при соблюдении применяемой на предприятии рецептуры. При соблюдении требований к качеству подготовки смеси в рецептуре предприятия было уменьшено содержание цемента на 9,8 %. Расчетный экономический эффект от использования научно-технической разработки составляет более 90 тысяч рублей. Результаты диссертационной работы используются в образовательном процессе БГТУ им В. Г. Шухова на кафедре «Механическое оборудование» в процессе обучения бакалавров и магистров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ оборудования для смешивания сухих смесей. Выявлены недостатки существующих конструкций, а также перспективные направления развития смесительного оборудования. Установлена целесообразность разработки нового технического решения, обеспечивающего повышение качества приготавливаемой смеси в горизонтальном лопастном смесителе.

2. Разработано защищенное патентом Российской Федерации техническое решение в виде установленных перед лопастями горизонтального лопастного смесителя стержневых элементов, обеспечивающее повышения качества подготовки сухой смеси.

3. В результате имитационного моделирования процесса смешивания двухкомпонентного материала в программной среде EDEM установлено, что наиболее целесообразно использовать два стержневых элемента цилиндрического профиля для достижения наименьших значений времени смешивания  $t$  и коэффициента неоднородности  $V_c$ .

4. Получены математические выражения, адекватно описывающие изменения концентрации ключевого компонента  $C$  и времени  $t$ , необходимого для достижения заданной концентрации ключевого компонента в разработанной конструкции лопастного смесителя. С их использованием проведены исследования параметров, характеризующих процесс смешивания, на примере подготовки мелкозернистой цементно-песчаной смеси в двухвальном горизонтальном смесителе периодического действия промышленного типа-размера с объемом рабочей камеры  $V=1 \text{ м}^3$  при установке стержневых элементов. Установлены и обоснованы закономерности процесса смешивания компонентов. Минимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{\min}=0,21$  достигается при следующих рациональных значениях конструктивно-технологических параметров лопастного смесителя:  $L_{\text{л.рац.}}=0,17 \text{ м}$ ,  $b_{\text{л.рац.}}=0,13 \text{ м}$ ,  $R_{\text{ц.рац.}}=0,003 \text{ м}$ ,  $h_{\text{рац.}}=0,17 \text{ м}$ ,  $n_{\text{рац.}}=1,0 \text{ с}^{-1}$  и  $\alpha_{\text{рац.}}=40^\circ$ . Наименьшее время смешивания  $t_{\min.}=18 \text{ с}$  для получения заданной концентрацией ключевого компонента  $C_k=0,215$  достигается при  $n_{\text{рац.}}=1,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $R_{\text{ц.рац.}}=0,007 \text{ м}$ ,  $\alpha_{\text{рац.}}=40^\circ$ ,  $r_{\text{рац.}}=0,3 \text{ м}$ .

5. Получено математическое выражение, адекватно описывающее изменение мощности, расходуемой на преодоление сил лобового сопротивления лопасти с установленными стержневыми элементами  $P_{л.с.}$ , являющейся составляющей общей мощности привода  $P_{прив.}$ . С его использованием исследовано влияние конструктивно-технологических параметров смесителя со стержневыми элементами, имеющего объем рабочей камеры  $V=1 \text{ м}^3$ , на мощность  $P_{л.с.}$ , затрачиваемую на преодоление сил лобового сопротивления при вращении лопастного вала в мелкозернистой цементно-песчаной смеси. Установлено, что при изменении числа оборотов лопастных валов в диапазоне  $n=0,5 \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$  на долю  $P_{л.с.}$  в общей величине  $P_{общ.}$  приходится около 9,4 %.

6. С использованием разработанной экспериментальной модели двухвального горизонтального смесителя периодического действия со стержневыми элементами получены математические выражения, в виде уравнений регрессии, адекватно описывающие зависимости коэффициента неоднородности  $V_c$  мелкозернистой цементно-песчаной смеси, предела прочности на сжатие изготовленных из нее бетонных образцов  $\sigma_{сж}$ , потребляемой приводом смесителя мощности  $P_{прив.эксп}$  от частоты вращения лопастных валов  $n$ , угла установки лопастей  $\alpha$  и расстояния  $c$  между стержневыми элементами и лопастью. Исследовано влияние на изменение  $V_c$ ,  $\sigma_{сж}$  и  $P_{прив.эксп}$  рассматриваемых конструктивно-технологических параметров и определены области их рациональных значений. Установлено, что:

- минимальное значение коэффициента неоднородности  $V_{c.min}= 2,6 \%$  достигается при частоте вращения лопастных валов  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$ , расстоянии между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти  $c=8 \text{ мм}$ , угле установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha=27^\circ$ ;

- максимальное значение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24,9 \text{ МПа}$  бетонных образцов, получаемых из приготовленной смеси, достигается при частоте вращения лопастных валов  $n=0,97 \text{ с}^{-1}$ , расстоянии  $c=6,3 \text{ мм}$  и угле  $\alpha=31,7^\circ$ ;

- общая мощность  $P_{прив.эксп}$ , потребляемая приводом смесителя, пропорциональна частоте вращения лопастных валов и углу установки лопасти. Максимальные значения мощности привода  $P_{прив.мах}=425 \text{ Вт}$  достигаются при  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$  и  $\alpha=40^\circ$ .

7. С использованием экспериментальной установки двухвального горизонтального смесителя со стержневыми элементами получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость концентрации  $C$  ключевого компонента мелкозернистой цементно-песчаной смеси от частоты вращения лопастных валов  $n$  и времени смешивания  $t$ . Исследовано влияние на изменение функции рассматриваемых параметров. Установлено, что процесс смешивания можно считать завершившимся, когда значение концентрации ключевого компонента достигает величины, незначительно изменяющейся при его продолжении.

8. Установлена адекватность математических выражений, полученных теоретическим путем, позволяющих определить изменение концентрации

ключевого компонента  $C$ , времени смешивания  $t$ , необходимого для получения заданной концентрации ключевого компонента и мощность, потребляемую приводом смесителя со стержневыми элементами. Максимальное расхождение между значениями, полученными теоретически и экспериментально, составляет для: концентрации ключевого компонента – 12,8 %; потребляемой приводом смесителя мощности – 10,5 %; времени смешивания – 12,7 %.

9. Разработана методика инженерных расчетов основных конструктивных и технологических параметров горизонтального лопастного смесителя со стержневыми элементами.

10. Осуществлено внедрение результатов исследования на горизонтальном лопастном смесителе периодического действия СГО-4 на предприятие ООО «Экохим-Инкапол. В результате производственных испытаний установлено, что расположение стержневых элементов перед лопастями смесителя обеспечивает при подготовке цементно-песчаной смеси В12,5:

- уменьшение коэффициента неоднородности получаемой смеси до 9,7 % и повышение предела прочности изготовленных из нее бетонных образцов до 8,1 % при соблюдении применяемой на предприятии рецептуры;
- соблюдение требований к качеству подготовки смеси при уменьшении содержания цемента на 9,8 %.

11. Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки студентов на кафедре «Механического оборудования» БГТУ им. В. Г. Шухова.

**Рекомендации.** Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать для модернизации существующих конструкций лопастных смесителей с горизонтальным расположением валов, а также в процессе обучения студентов и магистров по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» – профиль программы «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов» и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» – профиль программы «Разработка технологического оборудования и комплексов предприятий строительной индустрии».

**Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в** исследовании влияния стержневых элементов различной формы сечения на качество приготовления пластичных смесей в лопастных горизонтальных смесителях.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Ханин, С. И. Исследование возможности повышения качества подготовки сухих строительных смесей в горизонтальном лопастном смесителе / С. И. Ханин, Н. О. Кикин, О. С. Мордовская // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2021. – № 10. – С. 99–108.

2. Ханин, С. И. Исследование изменения концентрации ключевого компонента сухой смеси в горизонтальном лопастном смесителе с цилиндрическими стержнями / С. И. Ханин, В. П. Воронов, **Н. О. Кикин**, О. С. Мордовская // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2022. – № 2. – С. 94–101.

3. Ханин, С. И. Математическое описание мощности, потребляемой приводом горизонтального лопастного смесителя с цилиндрическими стержневыми элементами / С. И. Ханин, В. П. Воронов, **Н. О. Кикин**, О. С. Мордовская // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 75–82.

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

5. **Кикин, Н. О.** Определение коэффициента неоднородности сухой строительной смеси в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами / Н. О. Кикин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 67–72.

#### **В журнале, входящем в международную базу данных Scopus:**

6. Analysis of the Influence of Rod Elements on the Mixing Process of Two Components in a Twin-Shaft Paddle Mixer / S. I. Khanin, **N. O. Kikin**, R. V. Zybin, E. G. Khanina // Digital Technologies in Construction Engineering: Selected Papers, Белгород, 08–09 июня 2021 года. – Белгород: Springer, 2022. – P. 175–182.

#### **В объектах интеллектуальной собственности**

7. Пат. № 192657 РФ. МПК B28C 5/14, B01F 7/04. Смеситель материалов / Ханин С. И., **Кикин Н. О.** // заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова". – заявл. 25.06.2019; опубл. 25.09.2019.

#### **Публикации в других изданиях**

8. **Кикин, Н. О.** Анализ математических описаний процессов взаимодействия рабочих органов лопастных смесителей со смешиваемым материалом / Н. О. Кикин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25–27 мая 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 2112–2117.

9. **Кикин, Н. О.** Влияние вибрации на интенсивность смешивания в лопастных смесителях с горизонтальным расположением валов / Н. О. Кикин, М. В. Стародумов, В. В. Рябухин // Образование. Наука. Производство: Материалы X Международного молодежного форума с международным участием, Белгород, 01–15 октября 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. – С. 1092–1097.

10. **Кикин, Н. О.** Возможности повышения интенсификации процесса смешивания в смесителях с горизонтальным расположением валов / Н. О. Кикин, М. В. Стародумов, В. В. Рябухин // Образование. Наука. Производство: Материалы X Международного молодежного форума с международным участием, Белгород, 01–15 октября 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. – С. 1087–1091

11. **Кикин, Н. О.** Интенсификация процесса смешивания в смесителе принудительного действия путем устранения уплотнения из смешиваемого материала перед лопастью / Н. О. Кикин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – № 7. – С. 27–32.

12. **Кикин, Н. О.** Направления совершенствования лопастных смесителей с горизонтальным расположением валов / Н. О. Кикин, М. В. Стародумов, В. В. Рябухин // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник научных статей / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Шухова: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2017. – С. 127–136.

13. **Кикин, Н. О.** Определение коэффициента неоднородности сухой строительной смеси в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами / Н. О. Кикин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 67–72.

14. **Кикин, Н. О.** Применение программной среды EDEM для анализа качества смешения в лопастном смесителе / Н. О. Кикин, Е. Г. Ханина, К. Е. Ефросимов // Механизация и автоматизация строительства: сборник статей / Самарский государственный технический университет. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2020. – С. 70–75.

15. **Кикин, Н. О.** Различные схемы установки лопастей смесителей с горизонтальным расположением валов и их влияние на интенсивность смешивания / Н. О. Кикин, А. В. Лебах, А. Н. Семидоцкий // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей / Под редакцией В.С. Богданова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. – С. 201–205.

16. **Кикин, Н. О.** Симуляция процесса смешивания материала лопастным смесителем в программной среде EDEM / Н. О. Кикин, Е. Г. Ханина // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. Выпуск посвящен 50-летию кафедры механического оборудования, Белгород, 01–30 декабря 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 117–125.

17. **Кикин, Н. О.** Совершенствование конструкции рабочих органов смесителей с горизонтальным расположением валов с целью повышения интенсификации смешивания / Н. О. Кикин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Посвя-

щена 165-летию В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. – С. 2145–2149.

18. **Кикин, Н. О.** Сравнительная характеристика двухвальных смесителей зарубежного производства / Н. О. Кикин, Д. Г. Самойленко, Н. В. Болотникова, Л. Н. Котова // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвузовский сборник статей, Белгород, 01–20 декабря 2019 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2019. – С. 168–172.

19. **Кикин, Н. О.** Сравнительная характеристика двухвальных смесителей отечественного производства / Н. О. Кикин, Д. Г. Самойленко, Н. В. Болотникова, Л. Н. Котова // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвузовский сборник статей, Белгород, 01–20 декабря 2019 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2019. – С. 173–178.