

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»



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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р техн. наук, проф.  
Ханин Сергей Иванович

Белгород, 2023

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СМЕСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СУХИХ СМЕСЕЙ.....	11
1.1 Применение смесительного оборудования для производства сухих смесей	12
1.2 Особенности конструкций лопастных смесителей с горизонтальным расположением валов для приготовления сухих смесей и направления их совершенствования .....	20
1.3 Анализ математических описаний процесса смешивания в лопастных смесителях с горизонтальным расположением валов и методик расчета их основных конструктивно-технологических параметров .....	28
1.4 Цели и задачи научных исследований .....	37
1.5 Выводы по главе.....	38
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ДВУХВАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЯ СО СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	39
2.1 Разработка устройства, воздействующего на уплотнение из смешиваемых компонентов, возникающего перед рабочей поверхностью лопасти .....	39
2.2 Поиск конструктивных особенностей технического решения с помощью программного продукта EDEM .....	41
2.3 Математическое описание по определению концентрации ключевого компонента.....	51
2.4 Определение времени смешивания .....	63
2.5 Определение мощности, затрачиваемой на процесс смешивания.....	70
2.6 Выводы по главе.....	83
ГЛАВА 3. ПЛАН И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	85
3.1 Основные положения экспериментальных исследований.....	85

3.2 Описание экспериментальной установки, методов и средств контроля измерений.....	87
3.3 Физико-механические характеристики материалов.....	96
3.4 Методики экспериментальных исследований.....	98
3.5 План и программа экспериментальных исследований.....	104
3.6 Определение количества повторных опытов .....	105
3.7 Выводы по главе.....	107
<b>ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>108</b>
4.1 Обоснование выбора варьируемых факторов .....	108
4.2 Результаты экспериментальных исследований в смесителе с установленными стержневыми элементами.....	111
4.2.1 Установление закономерностей изменения коэффициента неоднородности от варьируемых факторов .....	113
4.2.2 Исследование прочности изделий из смеси, получаемой в смесителе со стержневыми элементами.....	119
4.2.3 Зависимость мощности, потребляемой приводом смесителя от варьируемых параметров.....	123
4.2.4 Определение рациональных значений конструктивно-технологических параметров смесителя со стержневыми элементами .....	127
4.3 Экспериментальное определение концентрации ключевого компонента ..	131
4.4 Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований в смесителе со стержневыми элементами .....	135
4.4.1 Проверка адекватности математических выражений, описывающих изменение концентрации ключевого компонента и времени смешивания ..	136

4.4.2 Проверка адекватности математического выражения, описывающего мощность, потребляемую приводом смесителя.....	138
4.5 Выводы по главе.....	140
<b>ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>143</b>
5.1 Инженерная методика расчета конструктивных и технологических параметров смесителя.....	143
5.2 Внедрение результатов исследований.....	153
5.3 Выводы по главе.....	156
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>158</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>169</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>188</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>189</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....</b>	<b>192</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....</b>	<b>193</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 работать 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., Капранова А. Б., Кафаров В. В., Керов И. П., Королев К. М., Лебедев А. Т., Лозовая С. Ю., Макаров Ю. И., Мартынов В. Д., Маслов А. Г., Мизонов В. Е., Першин В. Ф., Саленко Ю. С., Севров К. П., Селиванов Ю. Т., Уваров В. А., Хохлова Ю. В., Шарапов И. П., Шлегель И. Ф., 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 для производства сухих смесей, необходимо предложить техническое решение, которое сможет повысить качество подготовки смеси. При этом техническое решение должно быть эффективным и экономичным.

**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.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Работа соответствует паспорту специальности 2.5.21, а именно областям исследований:

4. Совершенствование производственных технологических процессов, включая погрузочно-разгрузочные, транспортные, перегрузочные и складские операции, на основе новых технических решений конструкций машин, транспортно-технологических систем, агрегатов, механизированного (автоматизированного, технологического оборудования и инструмента).

5. Разработка и совершенствование методов физического и математического моделирования рабочих процессов, прогнозирования, расчета конструкционных и технологических параметров, автоматизированного проектирования, оптимизации, управления, контроля качества технологических процессов, экспериментальных исследований и испытаний, диагностики и мониторинга, взаимодействия с окружающей средой и оператором (обслуживающем персоналом), риск-анализа и риск-ориентированного подхода при эксплуатации машин, комплектов машин, транспортно-технологических систем, агрегатов, механизированного технологического (автоматизированного и роботизированного) оборудования и инструмента.

**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 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.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СМЕСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СУХИХ СМЕСЕЙ

Получение качественных сухих смесей является важнейшим звеном технологического процесса в различных сферах народного хозяйства, как в промышленности, так и в сельском хозяйстве. [121].

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. [74].

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 работать как в непрерывном, так и в периодическом режимах [115]. 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. [14, 21, 40].

Широкое распространение горизонтальных лопастных смесителей в отечественной промышленности, 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.

## 1.1 Применение смесительного оборудования для производства сухих смесей

Мировые и отечественные предприятия выпускают смесители различного типа и принципа действий. Среди них стоит отметить пневматические, планетарные, роторные, барабанные смесители, а также лопастные смесители с горизонтальным расположением валов [24, 118, 131, 135].

Пневматические смесители представлены в основном зарубежными производителями. Это фирмы NOL-TEC (США), Petrosadid (Иран), Blendcon (США), LLC Intech GmbH (Германия), Metal Process (Польша) и другие [108, 109, 124, 125]. Однако в России существует несколько перспективных разработок в области пневматического смешивания сухих компонентов.

На рисунке 1.1 представлена схема пневматического смесителя, разработанная учеными БГТУ им. Шухова [126].

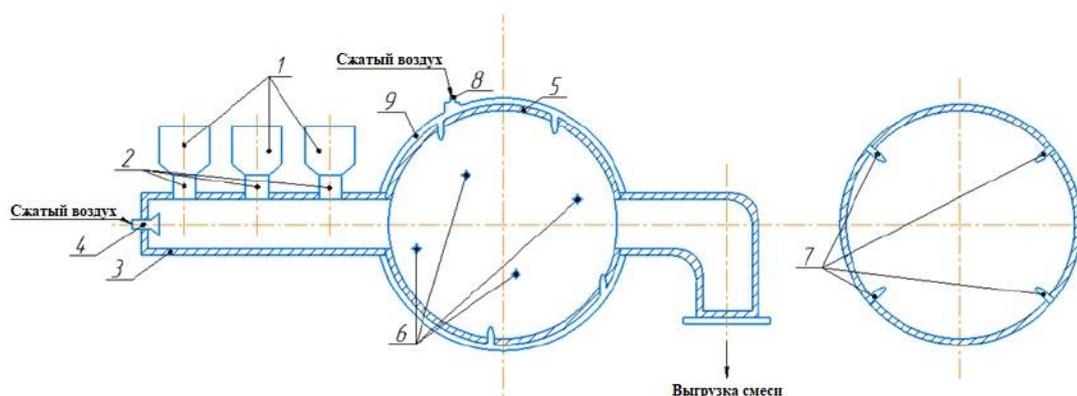


Рисунок 1.1. Схема пневматического смесителя для сухих компонентов:  
 1 – загрузочные бункеры; 2 – питатели компонентов; 3 – трубка подачи компонентов и воздуха;  
 4 – сопло повышенной производительности; 5 – рабочая камера смешивания;  
 6, 7 – сопла; 8 – подача сжатого воздуха; 9 – крышка смесителя.

Данный смеситель обеспечивает высокие показатели производительности, а также однородности готовой сухой смеси. Однородность достигается за счет образования вихревых потоков с помощью сопел 6 и 7, которые интенсифицируют процесс смешивания, изменяя траекторию движения компонентов смеси [126].

В работе [31] представлена конструкция аэрационного смесителя с псевдооживленным слоем смешиваемых компонентов (рисунок 1.2). Загруженные компоненты в корпус смесителя 1 под действием воздуха, который подается через па-

трубки 3, приводятся в псевдооживенное состояние, с возможностью перемещаться внутри корпуса. Воздух, проходящий через среду сыпучего материала, поступает в рукавный фильтр, где после очистки выходит в атмосферу через патрубок 10. Аэрационные смесители имеют большой объем и для того, чтобы материал не слеживался, цикл смешивания может продолжаться несколько часов. Автор [31] отмечает низкую эффективность данного смесителя при смешивании тонкодисперсных компонентов, которые значительно различаются по плотности, из-за возникновения каналообразования в слое смешиваемых сухих компонентов, что снижает однородность готового продукта.

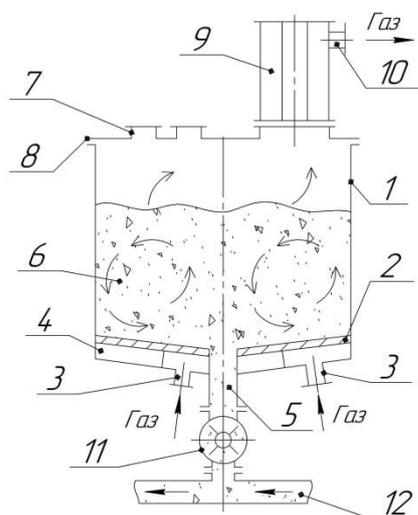


Рисунок 1.2. Схема аэрационного пневматического смесителя:

- 1 – корпус; 2 – решетка распределения воздуха; 3 – патрубок подачи воздуха; 4 – коллектор; 5 – выгрузка готовой смеси; 6 – смешиваемые компоненты; 7 – патрубок загрузки компонентов; 8 – крышка; 9 – фильтр; 10 – патрубок выхода очищенного воздуха; 11 – питатель; 12 – линия транспортировки готовой смеси

В целом, пневматические смесители позволяют получать высокооднородные смеси, обеспечивают большую производительность, а также они безопасны в эксплуатации, так как в их конструкции отсутствуют вращающиеся механизмы.

К недостаткам следует отнести высокий износ рабочей камеры смесителя из-за движения сыпучих компонентов с высокими скоростями, обязательная необходимость в дополнительном оборудовании – компрессоры, трубки, арматура, аспирационная система. В пневматических смесителях сложно обеспечить высокую степень однородности при смешивании компонентов, сильно отличающихся

ся друг от друга по своим размерам и массам. Помимо этого, пневматические смесители отличаются низким коэффициентом заполнения камеры смешивания (0,5...0,6) [31].

Планетарные смесители чаще используются для получения жёстких смесей и бетонов. Однако их также применяют для смешивания сухих компонентов. На отечественных заводах по производству строительных материалов в основном используются планетарные смесители зарубежного производства. Такие смесители выпускают фирмы NFLG (Китай), Simem, Sicoma (Италия), Elcon (Турция), BHS, Liebherr, Тека (Германия) и другие. Отечественные компании менее заметны на рынке по производству планетарных смесителей [9, 121, 122]. Так компания Техно-центр (г. Рыбинск, Ярославская область) выпускает модельный ряд планетарно-шнековых смесителей для получения сухих смесей. Промышленные смесители выпускаются с объемом рабочей камеры от 0,05 до 1 м<sup>3</sup>, частота вращения шнека находится в диапазоне от 2,6 с<sup>-1</sup> до 5 с<sup>-1</sup>, установленная мощность привода от 2,5 до 5 кВт. Планетарно-шнековые смесители для сухих компонентов выпускает также компания Агромаш (г. Москва), однако они предназначены в основном для пищевой промышленности. В связи с этим необходимо предлагать и внедрять в производство новые отечественные разработки планетарных смесителей.

В работах [12, 122, 123] с целью повышения эффективности смешивания предложена модель планетарного смесителя (рисунок 1.3), в котором рабочие органы выполнены в виде стержневых элементов цилиндрической формы. Стержни устанавливались по спирали на шестерне таким образом, чтобы повышался уровень взаимодействия их со смешиваемыми компонентами. Шестерня взаимодействует с зубчатым венцом, который крепится на внутренней стороне корпуса. При этом диаметр шестерни составляет 2/3 от диаметра корпуса.

Исследования показали, что эффективное смешивание происходит при загрузке рабочей камеры до 40 % от общего объема, частоте вращения ротора  $n=180$  мин<sup>-1</sup> и времени смешивания  $t=50$  с. При таких конструктивно-технологических параметрах коэффициент неоднородности готовой сухой смеси изменяется в пределах  $V_c=2,82...5,68$  % [10].

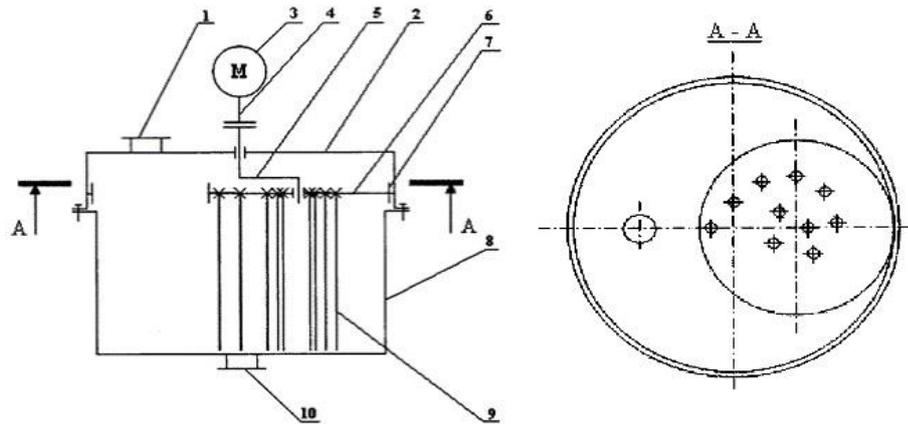


Рисунок 1.3. Схема планетарного смесителя со спиралевидной схемой установки рабочих органов:

- 1 – загрузочный патрубок; 2 – крышка; 3 – электродвигатель; 4 – вал; 5 – кривошип; 6 – шестерня; 7 – зубчатый венец; 8 – корпус; 9 – стержневые элементы; 10 – разгрузочное устройство

На рисунке 1.4 представлена схема рабочей камеры планетарного смесителя, предназначенная для смешивания сухих и вязких материалов [42, 91, 94].

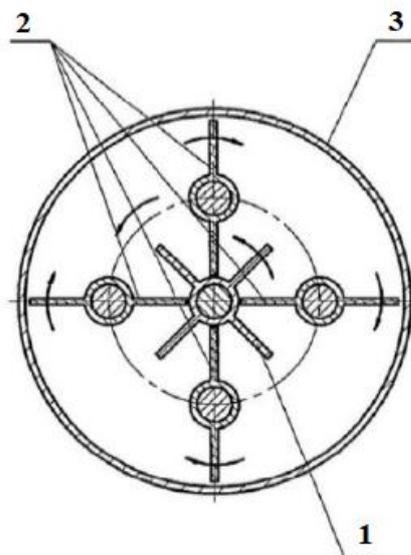


Рисунок 1.4. Схема рабочей камеры планетарного смесителя:  
1 – тихоходные лопасти; 2 – быстроходные лопасти; 3 – рабочая камера смесителя

Представленная конструкция смесителя позволяет исключить появление застойных зон в рабочей камере смешивания. Это достигается за счет минимальных зазоров между периферийными лопастями и стенками корпуса смесителя. Также за счет разных частот вращения тихоходных лопастей 1 и быстроходных лопастей 2 происходит лучшее перераспределение компонентов смеси и значительно сни-

жается действие центробежной силы на частички материала, практически, исключая их перемещение и прилипание к стенкам рабочей камеры [94].

Планетарные смесители позволяют получать высокооднородные смеси сухих компонентов с различными физическими свойствами. К положительным особенностям планетарных смесителей можно отнести большое количество разнообразий форм рабочих органов – стержневые элементы, лопасти, звездочки, комбинированные рабочие органы. К недостаткам следует отнести сложную конструкцию приводного механизма, а также невозможность обеспечивать непрерывный режим работы.

Высокоскоростные смесители применяются для получения однородных сухих смесей за сравнительно небольшое время смешивания. За счет высоких скоростей вращения рабочих органов происходит быстрый массообмен между смешиваемыми компонентами.

Зарубежные производители высокосортных смесителей представлены фирмами Eirich, Ziklos, Remat (Германия), CoNele (Китай) и другими компаниями [23, 96]. В отличие от планетарных и пневматических смесителей, высокоскоростные смесители широко представлены на отечественном рынке оборудования. В России производством этих видов смесителей занимаются предприятия ООО НПП «Вулкан-ТМ» (г. Пермь), Техприбор (г. Щекино, Тульская область), ПАО «Тяжстанкогидропресс» (г. Новосибирск), ООО «ПК Бизнес Спектр» (г. Санкт-Петербург) и другие [49, 32]. Существует большое количество технических решений по совершенствованию конструкций высокоскоростных смесителей.

На рисунке 1.5 представлена модель спирально-лопастного смесителя с высокоскоростным режимом смешивания для сухих смесей, разработанная на кафедре механического оборудования в БГТУ им. В. Г. Шухова [18, 23, 35].

При вращении вала лопасти 4 поднимают материал и набрасывают его на спираль 5, создавая как вертикальное, так и горизонтальное движение смешиваемых компонентов. Имеющиеся разрывы между лопастями создают турбулентные потоки смеси. В результате этого увеличивается степень однородности конечного продукта и сокращается время смешивания материалов.

Экспериментально было установлено, что рациональные значения коэффициента неоднородности  $V_c=3,1...3,7\%$  достигаются при диапазоне частоты вращения вала  $n=500...600\text{ мин}^{-1}$ , при этом диапазон числа оборотов шнека с трехзаходной спиралью составляет  $n_{\text{шн.}}=30...40\text{ мин}^{-1}$  [34].

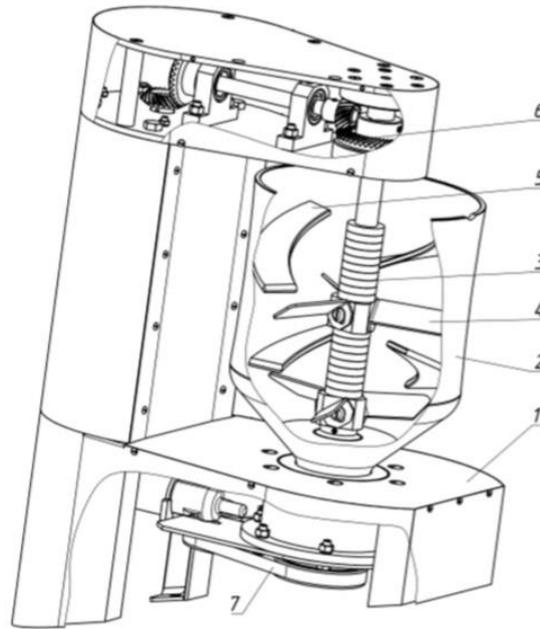


Рисунок 1.5. Модель спирально-лопастного смесителя:  
1 – корпус; 2 – барабан; 3 – ротор; 4 – лопасти вала; 5 – спирали; 6 – верхний привод;  
7 – нижний привод

Высокоскоростной смеситель Спектр ВЛС 150/200, представленный на рисунке 1.6, является разработкой компании «ПК Бизнес Спектр» (г. Санкт-Петербург) [18, 23].

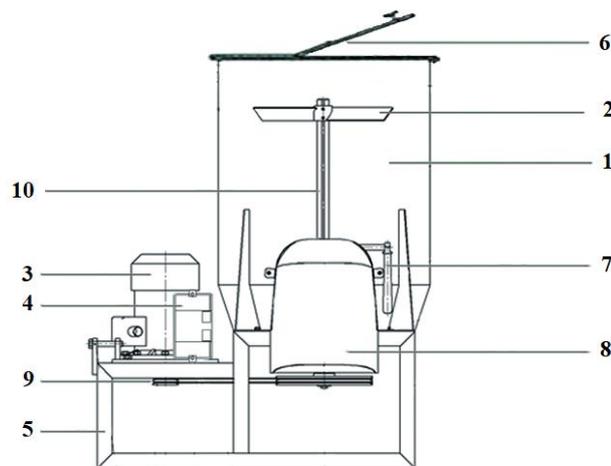


Рисунок 1.6. Схема смесителя Спектр ВЛС 150/200:  
1 – камера смесителя; 2 – лопасти; 3 – электродвигатель; 4 – панель управления; 5 – рама;  
6 – крышка; 7 – рычаг; 8 – выгрузочный патрубок; 9 – ременная передача; 10 – вал

При высоких частотах вращения лопастного вала с установленными лопастями, в рабочей камере создается псевдооживленный слой из смешиваемых компонентов, позволяющий осуществлять смешивание компонентов за короткий промежуток времени. В зависимости от коэффициента загрузки смесителя, а также свойств смешиваемых компонентов, регулируется высота установки лопастей 2 на нужный уровень. Технические возможности смесителя позволяют получить смесь с коэффициентом неоднородности  $V_c < 3\%$ , а время цикла смешивания составляет 2 минуты [23].

К достоинствам высокоскоростных смесителей следует отнести высокую степень однородности приготавливаемых смесей, способность приготавливать смеси с различными физическими свойствами исходных компонентов, а также высокую производительность [10].

К недостаткам данных смесителей следует отнести высокое энергопотребление, а также износ рабочих органов смесителя в результате интенсивного взаимодействия со смешиваемыми компонентами [10].

Для получения сухих строительных смесей в непрерывном режиме работы часто используются барабанные смесители. Среди зарубежных производителей барабанных смесителей следует выделить компании Foeth (Нидерланды), Zhengzhou Jinhe Machinery Manufacture, Shunxin (Китай), John R Boone Ltd (Великобритания) и другие. Среди отечественных производителей следует отметить компании Молпромлайн (г. Москва), НПО ТОР (г. Ногинск), Росмаш (г. Санкт-Петербург) [101, 112]. Также существуют интересные технические решения, направленные на повышение качества приготовления сухих смесей в барабанных смесителях.

Исследователями [73, 89] предложена конструкция барабанного смесителя для сухих компонентов с установленными в спиралевидном порядке Г-образными лопастями (рисунок 1.7). При таком расположении лопастей часть компонентов приготавливаемой смеси возвращается к начальной точке, что обеспечивает увеличение времени пребывания компонентов в камере смешивания. Таким образом, компоненты равномерно распределяются в объеме приготавливаемой смеси.

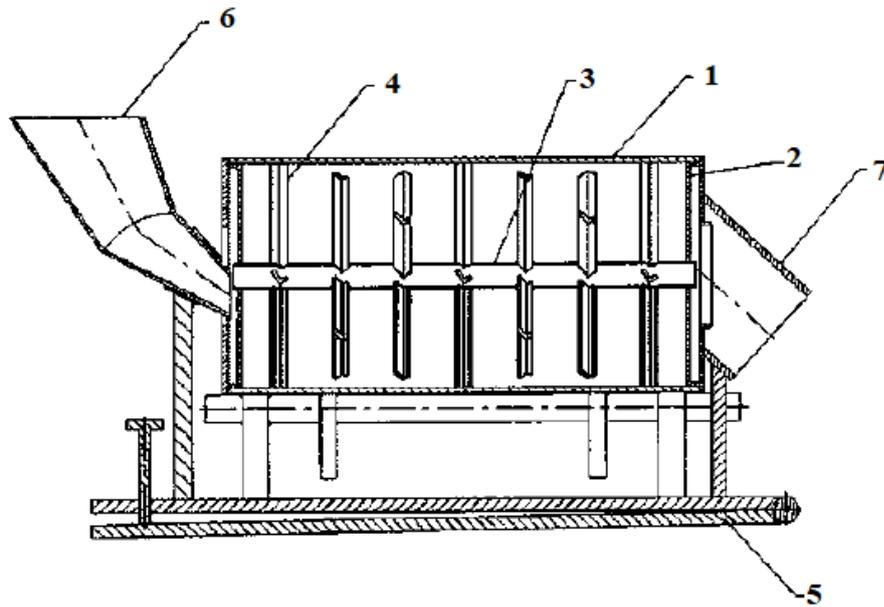


Рисунок 1.7. Схема барабанного смесителя с Г-образными лопастями:  
 1 – корпус; 2 – торцевой диск; 3 – лопастной вал; 4 – Г-образные лопасти; 5 – рама;  
 6 – загрузочный патрубок; 7 – разгрузочный патрубок

С целью повышения однородности приготавливаемых смесей, авторами [4] предложена конструкция барабанного смесителя непрерывного действия (рисунок 1.8).

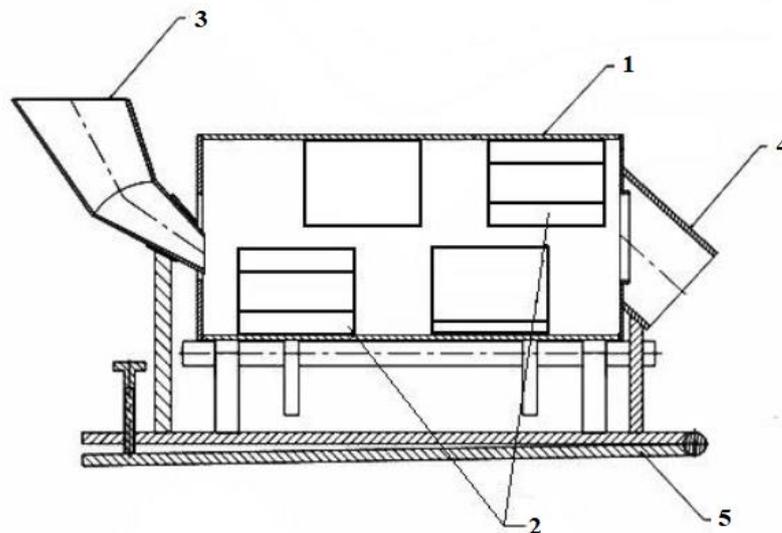


Рисунок 1.8. Схема барабанного смесителя непрерывного действия:  
 1 – корпус; 2 – спиральные направляющие; 3 – патрубок загрузки исходных компонентов;  
 4 – разгрузочный патрубок; 5 – рама

Установленные внутри корпуса 1 в произвольном порядке спиралевидные направляющие 2, позволяют изменять направление движения смешиваемых компонентов внутри барабана, тем самым обеспечивая частичную рециркуляцию смеси и увеличивая время их пребывания в барабанном смесителе. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что при частоте вращения барабана  $n=30$  мин<sup>-1</sup>, коэффициент неоднородности смеси из песка и ферромагнитного порошка не превышает  $V_c < 10\%$  [4].

Барабанные смесители отличаются большой производительностью, возможностью работать как в периодическом, так и непрерывном режимах работы. Однако данные машины обладают большой металлоемкостью, и, по сравнению с планетарными и высокоскоростными смесителями, позволяют получать смеси с более высокими значениями коэффициента неоднородности.

Рассмотренные конструкции смесителей наиболее часто применяются при производстве сухих смесей. В настоящее время научные исследования, направленные на повышение эффективности смешивания сыпучих материалов, должны привести к рациональным конструктивным решениям для применяемого смесительного оборудования в производстве сухих смесей.

## **1.2 Особенности конструкций лопастных смесителей с горизонтальным расположением валов для приготовления сухих смесей и направления их совершенствования**

В номенклатуре смесительных агрегатов отечественных и зарубежных производителей особое место занимают смесители с горизонтальным расположением валов. Благодаря своим технологическим параметрам применение данных смесителей в производстве сухих смесей широко распространено [15, 21, 60].

Лопастные смесители с горизонтальным расположением валов выпускает большое количество предприятий по всему миру [28, 81]. Так одновальные и двухвальные лопастные смесители выпускают зарубежные предприятия Elcon

(Турция), Amman, Wiggert & Co, BHS (Германия), Gericke (Швейцария), Charles Ross & Son Company (США), Zenit, CoNele (Китай) и другие [66, 69]. Среди российских производителей смесителей с горизонтальным расположением валов следует выделить компании СтройМеханика (г. Тула), ООО К+ (г. Электросталь, Московская область), ЗЗБО (г. Златоуст, Челябинская область), Самарский опытно-экспериментальный завод (г. Самара) и другие [67, 69, 85, 109, 124].

Смесители с горизонтальным расположением валов в качестве перемешивающих органов снабжены лопастями, лентами, плужками и подобными конструктивными элементами. Рабочие органы активно воздействуют на перемешиваемые сухие компоненты, поэтому изменение их конструкции оказывает существенное влияние на качественные показатели смеси [15, 141].

Швейцарская фирма Gericke и американская компания Charles Ross & Son Company предлагают двухвальные и одновальные смесители для получения сухих смесей. В выпускаемых моделях смесителей на горизонтальных валах располагаются комбинированные рабочие органы различной формы. Так швейцарский смеситель GCM500 фирмы Gericke имеет рабочие органы в виде рамки, с закрепленными на ней лопастями, и спиралевидную ленту (рисунок 1.9). Смеситель обеспечивает высокую однородность сухих смесей за счет большой площади активного взаимодействия рабочих органов со смешиваемыми компонентами, однако имеет большую металлоемкость, а также высокую потребляемую мощность, обусловленную увеличенными силами сопротивления смеси действию рабочих органов [9, 107].

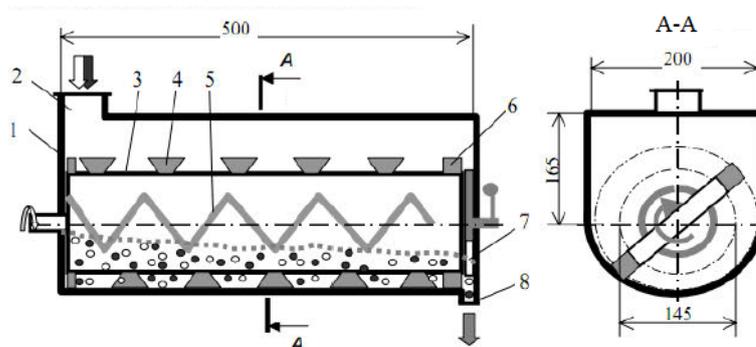


Рисунок 1.9. Схема смесителя GCM500 фирмы Gericke (Швейцария):  
 1 – корпус; 2 – патрубок загрузочный; 3 – рамка; 4 – лопасти; 5 – спираль;  
 6 – лопасти разгрузочные; 7 – устройство разгрузочное; 8 – патрубок разгрузочный

Компания СтройМеханика выпускает смесители с горизонтальным расположением валов с перемешивающими рабочими органами в виде лопаток лемехового типа серии Турбомикс. Существующие типы циклических смесителей обеспечивают производительность до  $0,4 \text{ м}^3$  за 3–4 минуты, потребляемая ими мощность составляет 18,5 кВт. Аналогичное решение предлагается компанией К+ в виде смесителя СБ-97МК (рисунок 1.10) [9, 13, 22, 72, 135].

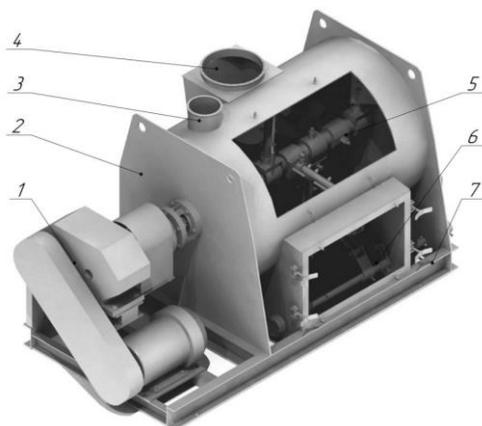


Рисунок 1.10. Лопастной смеситель СБ-97МК:

1 – привод; 2 – корпус; 3 – патрубок аспирации; 4 – патрубок подачи материала; 5 – лопастной вал; 6 – выгрузное устройство; 7 – рама

Для повышения однородности сухой смеси авторами [6] предложено устанавливать на валах двухвальных смесителей лопатки, выполненные в виде спиральной ленты по форме листа Мебиуса, концы которой закреплены на держателе лопастного ротора в одной плоскости (рисунок 1.11).

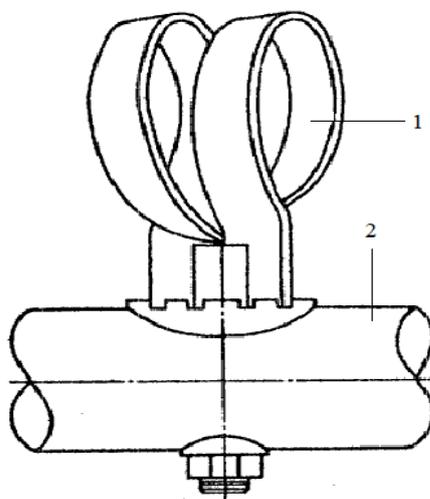


Рисунок 1.11. Лопатка в виде спиральной ленты:  
1 – лопатка; 2 – вал смесителя

Предложенное техническое решение позволяет изменять направление движения потока смешиваемых компонентов за счет сложной формы рабочего органа, однако изготовление такой лопасти затруднительно. Также ухудшается транспортирующая способность такой лопасти, что в непрерывном режиме работы смесителя может отрицательно сказаться на его производительности.

В работе [106] изучено взаимодействие смеси с лопастями плоской и винтообразной формы. Сформулировано предположение, что винтообразная поверхность лопасти позволяет изменять траекторию движения смешиваемых компонентов. При этом движение частиц материала происходит по спиралевидной траектории, которая по своей длине больше, чем траектория движения частиц при контакте с плоской лопастью. По мнению автора это может способствовать улучшению качества готовой смеси из сухих компонентов.

В работе [92] предложена конструкция одновального лопастного смесителя с горизонтальным расположением валов (рисунок 1.12). Отличительная особенность смесителя заключается в установке перед лопастью разрушителя в виде металлического стержня, который воздействует на смешиваемые компоненты.

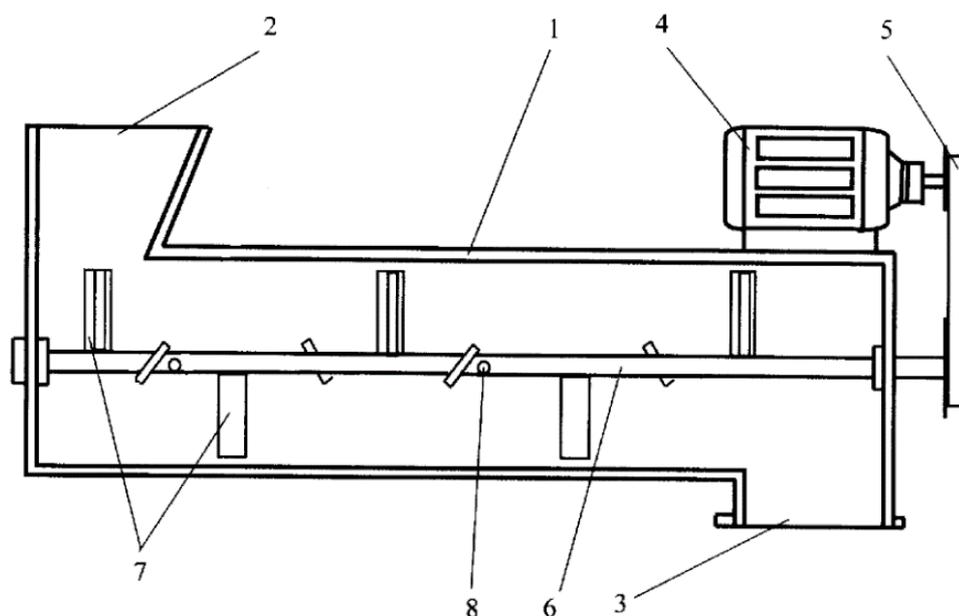


Рисунок 1.12. Схема устройства лопастного смесителя:

- 1 – корпус; 2 – загрузочное отверстие; 3 – разгрузочное отверстие; 4 – электродвигатель;  
5 – клиноременная передача; 6 – вал; 7 – лопасть; 8 – разрушитель

Стержень устанавливается в продолговатом пазу, выполненном на валу, перед лопастью. В зависимости от физико-механических свойств смешиваемых компонентов расстояние от стержня до лопасти можно регулировать, перемещая разрушитель в пазу вала. Установленный разрушитель позволяет разрыхлять смешиваемые компоненты, разрушая слипшиеся конгломераты смеси, тем самым повышая её однородность. Однако вызывает сомнение, что при приготовлении мелкозернистых сухих смесей предлагаемая установка разрушителя на валу оказывает должное влияние на уплотнение из смешиваемых компонентов перед рабочей поверхностью лопасти. Вследствие этого не следует ожидать улучшения показателей однородности смеси.

Влияние на процесс смешивания оказывает схема установки лопастей на валах. В работах [52, 71] предложена поточно-контурная схема установки лопастей, в которой лопасти на каждом валу установлены в одном направлении, за исключением пар «отбойных» лопастей на конце каждого вала (рисунок 1.13). Эксперименты показали, что при такой схеме установки лопастей улучшается качество перемешивания, увеличивается производительность, уменьшается энергоёмкость процесса.

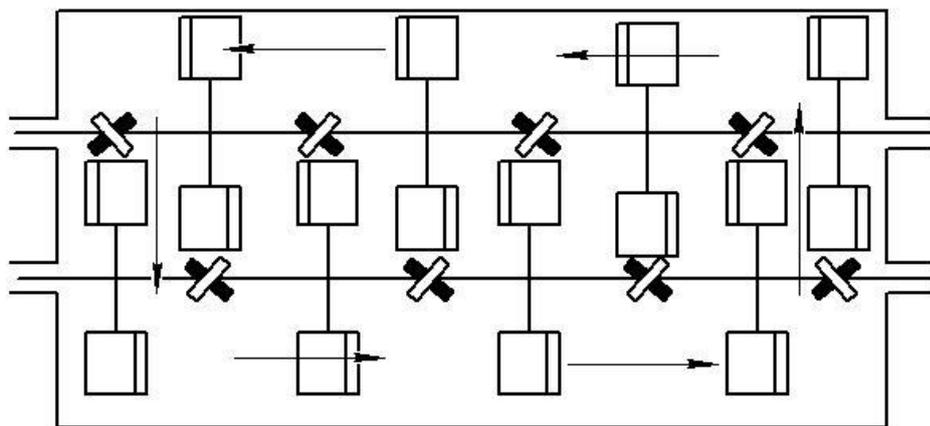


Рисунок 1.13. Поточно-контурная схема установки лопастей

В работе [52, 71] представлен двухвальный смеситель, на валах которого установлены лопасти одного типа (кроме двух пар в зоне загрузки компонентов смеси), у которых рабочая поверхность лопасти является элементом винтовой поверхности шнека. Так как валы вращаются в разных направлениях, то подобная

схема расположения лопаток образует кольцевое движение смеси в плане по контуру смесителя. Кольцевое движение смеси выравнивает заполнение смесью рабочей камеры смесителя и повышает однородность готовой смеси. Однако для смесителей непрерывного режима работы данная схема установки лопастей приведет к снижению производительности.

Авторами [8] предложена конструкция одновального лопастного смесителя, который имеет центральные и периферийные лопасти (рисунок 1.14). Техническое предложение заключается в том, что центральные лопасти, расположенные ближе к оси вала, перемещают смесь в одно направление, а периферийные лопасти – в другую сторону, благодаря противоположному углу их установки относительно плоскости вращения. В результате этого происходит изменение направления потока материала, вследствие чего улучшается качество приготавливаемой смеси.

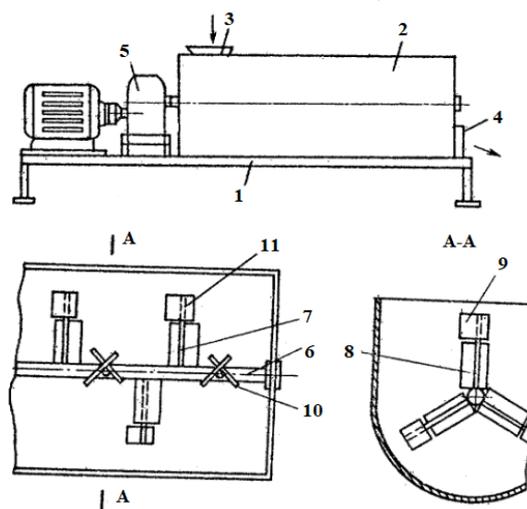


Рисунок 1.14. Схема лопастного смесителя:

- 1 – опорная рама; 2 – корпус; 3 – загрузочное отверстие; 4 – разгрузочное отверстие; 5 – привод;  
 6 – вал; 7 – кронштейн лопасти; 8 – центральные пластины; 9 – периферийные пластины;  
 10 – центральный винтовой побудитель; 11 – периферийный винтовой побудитель

Недостатки данного лопастного смесителя – повышенная металлоемкость конструкции, а также образование застойных зон при движении рабочих органов в смешиваемой среде.

Особое внимание заслуживает исследование процессов, происходящих при смешивании сухих компонентов в лопастных смесителях с горизонтальным расположением валов. Так большое число научных работ [37, 38, 39, 40, 41, 75, 76, 95] описывают процесс образования уплотнения из смешиваемых компонентов перед рабочей поверхностью лопасти при её движении в среде сыпучих мелкозернистых материалов.

В работе [95] исследовано образование уплотнения из смешиваемых мелкозернистых компонентов перед рабочей поверхностью лопасти в зависимости от угла её установки относительно плоскости вращения (рисунок 1.15). Установлено, что максимальный размер уплотнения из смешиваемых компонентов достигается при угле установки лопасти  $\alpha$  более  $30^\circ$  (рисунок 1.15, а). При  $\alpha=30^\circ$  застойная зона перед лопастью начинает разрушаться (рисунок 1.15, б). Когда угол установки лопасти становится меньше  $25^\circ$ , уплотнение из смешиваемых компонентов не образуется (рисунок 1.15, в).

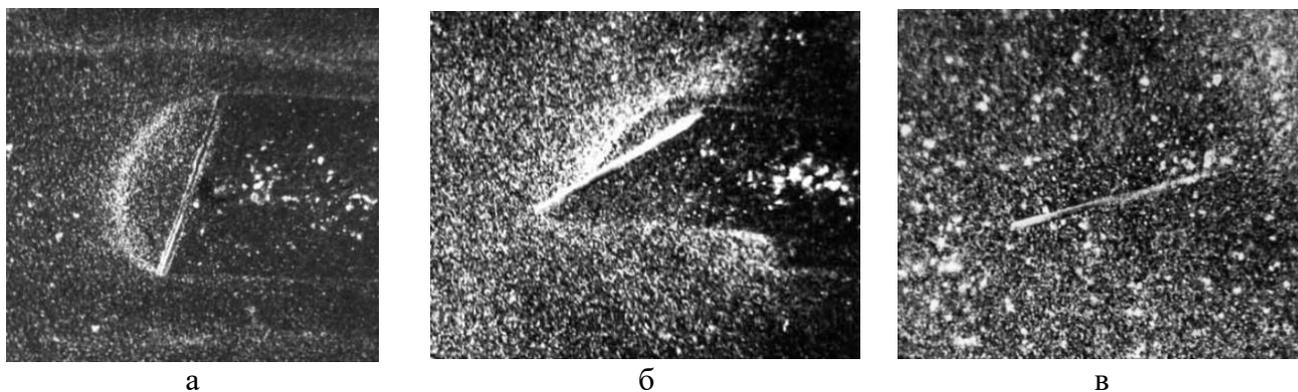


Рисунок 1.15. Образование уплотнения из смешиваемого мелкозернистого сухого материала при движении лопасти:  
 а – угол установки лопасти больше  $\alpha=30^\circ$ ; б – угол установки лопасти  $\alpha=30^\circ$ ; в – угол установки лопасти меньше  $\alpha=25^\circ$

В работе [77] уточняется, что помимо уплотнения из смешиваемых компонентов, возникающего при движении лопасти в мелкозернистой сыпучей среде, возникает зона деформации смешиваемых компонентов, размеры которой превышают размеры самой лопасти.

Автор [41] провел теоретические и экспериментальные исследования движения лопасти в среде смешиваемого сыпучего материала. Установлено, что ско-

рость движения частиц внутри уплотнения, возникающего перед рабочей поверхностью лопасти, гораздо меньше, чем на границе его образования. Определено, что перед лопастью, расположенной под прямым углом к плоскости её вращения, образуется «застойная» зона, сформированная из неподвижных частиц смешиваемых компонентов относительно лопасти.

Также автором была предложена конструкция одновального лопастного смесителя (рисунок 1.16) для приготовления сухих смесей [37, 38, 39, 40, 41]. Суть предложенного технического решения заключается в возможности изменять угол установки лопастей во время работы смесителя с помощью специального механизма.

Механизм поворота обеспечивает управление положением лопаток на валу смесителя, что приводит к быстрому и равномерному распределению исходных компонентов по рабочему объему смесителя, позволяет влиять на размер уплотнения из смешиваемых компонентов перед рабочей поверхностью лопасти, уменьшая время смешивания и улучшая качество смесеприготовления [38].

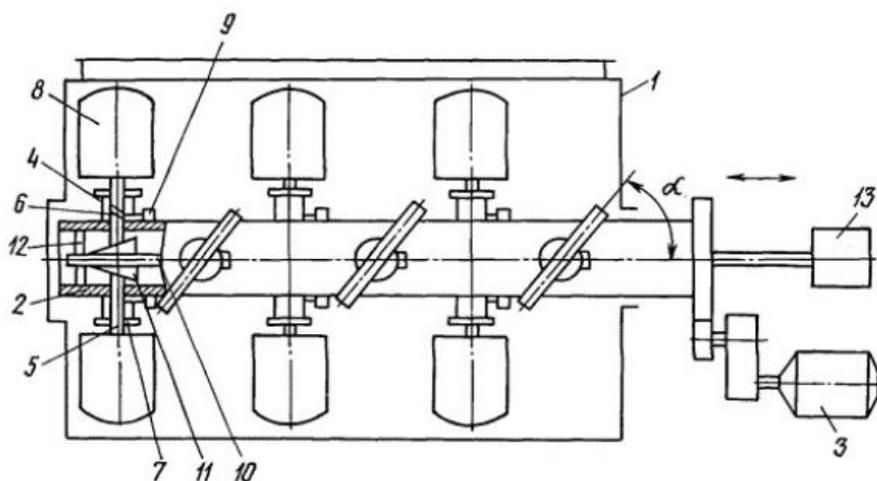


Рисунок 1.16. Схема смесителя с изменяющимися углами поворота лопаток:

- 1 – корпус; 2 – полый вал; 3 – электродвигатель; 4 – втулка; 5 – ось; 6 – винтовые канавки;  
7 – уплотнения; 8 – лопатка; 9 – штифт; 10 – штанга; 11 – упор; 12 – направляющая втулка;  
13 – реверсивный исполнительный механизм

Данная конструкция позволяет выбирать рациональный угол поворота лопасти во время приготовления сухой смеси [40]. Например, при пуске двигателя, когда расход электроэнергии достигает максимума, лопатки устанавливаются под

углом  $90^\circ$  относительно горизонтальной оси вала, что позволяет снизить пусковой момент на валу.

Экспериментальные исследования работы данного смесителя показали, что происходит снижение времени смешивания приблизительно на 4% [38].

К недостаткам данного смесителя следует отнести сложную конструкцию и низкую надежность механизма изменения положения лопасти.

Обобщая проанализированную информацию, следует сделать вывод, что для улучшения качественных показателей приготовленных сухих смесей в смесителях с горизонтальным расположением валов существует целый ряд направлений. Среди них необходимо выделить [60]:

- изменение угла поворота лопаток относительно оси вала смесителя;
- организация различных режимов движения смеси в рабочей камере;
- использование комбинированных рабочих органов;
- изменение схемы установки лопаток на валах смесителя;
- изменение конструкции рабочих органов.

Особое внимание необходимо обратить на процессы, которые негативно сказываются на качестве приготавливаемых смесей в лопастных смесителях, например, образование уплотнения из смешиваемых компонентов перед рабочей поверхностью лопасти. Для решения этой проблемы целесообразно разработать конструкцию рабочих органов, которая будет осуществлять дополнительное воздействие на образующееся уплотнение.

### **1.3 Анализ математических описаний процесса смешивания в лопастных смесителях с горизонтальным расположением валов и методик расчета их основных конструктивно-технологических параметров**

Задача процесса смешивания сводится к получению смесей высокой степени однородности, что приводит к повышению качества готовых изделий. Для это-

го следует использовать конструкцию смесителя, который сможет обеспечить необходимую интенсивность перемешивания и высокое качество продукции.

С экономической точки зрения любой процесс должен сопровождаться высоким выходом готового продукта при наименьшей потребляемой мощности. Для этого необходимо установить рациональные параметры новой конструкции смесительных машин. Математическое моделирование процессов смешивания помогает решить эту проблему.

Один из показателей качества смешивания является однородность приготавливаемой смеси. Существует большое количество способов оценки однородности получаемой смеси [19, 20, 16, 70, 120]. В работе [79] в сводной таблице представлены величины, предложенные различными авторами в качестве критериев для оценки качества смеси сыпучих материалов.

Наиболее часто для качественной оценки сухих смесей используется коэффициент неоднородности или коэффициент вариации,  $V_c$ , % [21, 79]. В основу определения коэффициента неоднородности заложено определение среднего квадратического отклонения концентрации ключевого компонента в пробах, которые были изъяты из приготавливаемой смеси. Концентрация – это величина, которая количественно характеризует содержание ключевого компонента относительно всей смеси. В научных публикациях за ключевой принимается компонент, содержание которого можно легко проанализировать в многокомпонентной смеси. Иногда ключевым считается компонент, распределение которого в смеси важно по технологическим требованиям. Так как смешивание это процесс стохастический (случайный), поэтому величина коэффициента неоднородности определяется статистическими методами по следующему выражению [29]:

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^{n_{np}} (c_i - \bar{c})^2}, \quad (1.1)$$

где  $n_{np}$  – число проб;

$\bar{c}$  – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех  $n$  пробах смеси, %;

$c_i$  – концентрация ключевого компонента в  $i$ -ой пробе, %.

Государственный стандарт не определяет коэффициент неоднородности как качественный показатель сухих строительных смесей. Однако в работах [10, 29] указано, что отличное качество смесей достигается при значении коэффициента неоднородности  $V_c < 5 \%$ , хорошее качество смешивания характеризуется пределами значений коэффициента неоднородности  $5 \% < V_c < 10 \%$ , а удовлетворительное качество смешивания достигается при значениях  $10 \% < V_c < 20 \%$ .

Еще одним немаловажным параметром в смесителях периодического действия является время смешивания  $T_{\Pi}$ , которое необходимо для достижения оптимального состояния смеси [55].

Автор предложил критериальное уравнение времени перемешивания:

$$T_{\Pi} = c_{\Pi} \cdot Re_{\Pi}^{-0,33} \cdot Fr^{0,51} \cdot \Gamma_{\rho}^{-0,5} \cdot \Gamma_l^{0,82} \cdot \Gamma_A^{-1,1} \cdot \Gamma_{\alpha}^{0,98} \Gamma_M^{-1,0} \Gamma_v^{-0,54}, \quad (1.2)$$

где  $c_{\Pi}$  – постоянный коэффициент;

$Re_{\Pi}$  – критерий Рейнольдса, характеризующий влияние сил вязкости и сил инерции.

$Fr$  – критерий Фруда, отражающий отношение сил инерции силам тяжести.

$\Gamma_{\rho} \dots \Gamma_v$  – симплексы геометрического подобия:

$\Gamma_{\rho}$  – фактор прерывности;

$\Gamma_l$  – характеристики бетоносмесителя;

$\Gamma_{\alpha}$  – фактор интенсивности перемешивания;

$\Gamma_M$  – фактор противоточности;

$\Gamma_v$  – фактор скорости.

Рассмотренное критериальное уравнение содержит в себе много приближений и допущений, поэтому математическое описание времени смешивания, согласно выражению (1.2), не может быть достаточно точным.

В общем случае время цикла смешивания, включающее загрузку компонентов, непосредственно время смешивания, разгрузку смеси и очистку рабочей камеры смесителя, можно определить по формуле [79, 105]:

$$t_{\Pi} = t_3 + t + t_B, \quad (1.3)$$

где  $t_{\Pi}$  – полное время цикла смешивания, с;

$t_3$  – время, затрачиваемое на загрузку рабочей камеры смесителя, с;

$t$  – время, затрачиваемое на смешивание компонентов, с;

$t_B$  – время, затрачиваемое на выгрузку и очистку рабочей камеры смесителя,

с.

Математическое описание времени смешивания в смесителях с горизонтальным расположением валов можно реализовать с помощью современных компьютерных программ, например *Delphi 7.0*. Особенно это помогает в том случае, если формула, позволяющая определить время смешивания, очень громоздка и сложна. Так в работах [118, 119] представлена математическая модель, позволяющая определить время смешивания в шнеколопастном смесителе.

$$\tau_{ц} = 2 \cdot \left( \frac{Q_{пт2}}{Q_{пт2} + Q_{пер}} \cdot \left( \frac{m}{Q_{ш}} + \frac{m}{Q_{л}} \right) + \frac{m}{Q_{пт1}} + \tau_{п} + \frac{m}{Q_{пт2} + Q_{пер}} \right), \quad (1.4)$$

где  $Q_{пт2}$  – осевая подача второго шнекового участка, кг/с;

$Q_{пер}$  – величина поперечной подачи на участке перемешивающе-транспортирующих лопаток, кг/с;

$m$  – масса загружаемых компонентов, кг;

$Q_{ш}$  – величина подпора, кг/с;

$Q_{л}$  – величина поперечной подачи на участке перебрасывающих лопастей, кг/с;

$Q_{пт1}$  – осевая подача первого шнекового участка, кг/с;

$\tau_{п}$  – время перебрасывания материала с одного рабочего органа смесителя на другой, с.

В дальнейшем автор предлагает расчет каждого из членов, входящих в расчет времени смешивания. Однако окончательное выражение для определения времени смешивания является весьма громоздким и неудобным для его использования в практических целях.

Авторы [110] предлагают формулу определения времени смешивания, которое необходимо для достижения определенного показателя качества смеси:

$$T_c = -\frac{1}{k} \cdot \ln \frac{(1-\theta_k)}{(1-\theta_H)}, \quad (1.5)$$

где  $T_c$  – время смешивания, необходимое для достижения оптимального конечного показателя качества  $\Theta_k$ ;

$k$  – эмпирический коэффициент интенсивности перемешивания,

$\Theta_n$  – начальное состояние качества смеси;

$\Theta_k$  – конечное состояние качества смеси.

Эта формула имеет ряд допущений и предположений. Во-первых, коэффициент интенсивности перемешивания должен учитывать конструктивные и технологические параметры смесителя, а также физико-механические свойства смешиваемых компонентов. Поэтому, используя этот коэффициент, автор идет на упрощение. Во-вторых, конечное состояние качества смешивания определяется технической возможностью смесителя обеспечить это качество, поэтому величина  $\Theta_k$  не может быть выше определенного максимального значения, которое, на наш взгляд, может определиться только экспериментальным путем.

Важнейшим параметром оптимизации для новых моделей смесителей с горизонтальным расположением валов является мощность, потребляемая приводом.

В работе [81] представлена формула для вычисления мощности привода  $N$  лопастного смесителя с горизонтальным расположением валов:

$$N = \frac{\omega \cdot q \cdot b \cdot (r_n^2 - r_b^2) \cdot z \cdot \varphi}{2000 \cdot \eta}, \quad (1.6)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вала, рад/с;

$q$  – коэффициент сопротивления движению лопасти в смеси, Па;

$b$  – проекция ширины лопасти на плоскость, перпендикулярную направлению вращения, м;

$r_n$  – радиус наружной кромки лопасти, м;

$r_b$  – радиус внутренней кромки лопасти, м;

$z$  – количество лопастей, шт.;

$\varphi$  – степень заполнения корпуса смесью;

$\eta$  – КПД привода.

Данная формула позволяет достаточно точно определить потребляемую приводом мощность. Однако коэффициент сопротивления движению лопасти в

смеси зависит от свойств смешиваемых компонентов и от скоростных параметров смесителя, поэтому прежде необходимо получить достоверный коэффициент для определенного типа смешиваемых компонентов.

Авторы [17, 100] предлагают для лопастных смесителей следующее выражение, позволяющее определить мощность, потребляемую приводом:

$$N = 0,001 \cdot z \cdot n \cdot r^3 \cdot (\gamma \cdot r \cdot (0,455 + 0,00014 \cdot n^2 \cdot r) + 2,744 \cdot \tau), \quad (1.7)$$

где  $N$  – мощность привода в л.с. (1 л.с. = 735,5 Вт);

$z$  – количество лопастей, шт.;

$r$  – радиус конца лопасти, м;

$\gamma$  – насыпная плотность смешиваемых компонентов, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – удельное сопротивление сдвига, Па.

Формула (1.7) схожа с выражением (1.6), так как учитывает скоростные параметры смесителя, наличие и количество лопастей, а также физико-механические свойства смешиваемых компонентов. Однако в формуле (1.7) не учитывается внутренний радиус вращения лопасти, или диаметра вала, который не участвует в процессе смешивания.

Наиболее эффективная методика расчета мощности, затрачиваемой приводом двухвальных смесителей, представлена в работе [82], согласно которой общая мощность привода определяется по формуле:

$$N_{\text{прив}} = \frac{\lambda \cdot (N_1 + N_2 + N_3 + N_4)}{\eta}, \quad (1.8)$$

где  $N_{\text{прив}}$  – мощность, затрачиваемая приводом смесителя, Вт;

$\lambda$  – коэффициент, учитывающий дополнительные энергетические потери;

$N_1$  – мощность, затрачиваемая на преодоление лопастью лобового сопротивления в среде сыпучих материалов, Вт;

$N_2$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о поверхность лопасти, Вт;

$N_3$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о стенки корпуса лопастного смесителя, Вт;

$N_4$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о кронштейн лопасти, Вт;

$\eta$  – КПД привода.

Составляющая  $N_1$  определяется по формуле:

$$N_1 = \pi \cdot R_{\text{ср}}^3 \cdot \text{tg}^3 \alpha \cdot \omega^3 \cdot i \cdot \rho \cdot (R^2 - r^2) \cdot c \cdot \psi \cdot \varphi, \quad (1.9)$$

где  $R_{\text{ср}}$  – средний радиус вращения лопасти, м;

$\alpha$  – угол установки лопасти, град;

$\omega$  – угловая скорость лопасти, рад/с;

$i$  – количество установленных лопастей, шт;

$\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – коэффициент сопротивления движению лопасти в смешиваемом материале.

$R, r$  – наружный и внутренний радиус вращения лопасти соответственно, м;

$\psi$  – коэффициент длины лопасти по окружности;

$\varphi$  – коэффициент, учитывающий заполнение корпуса смесью.

Составляющая  $N_2$  определяется по формуле:

$$N_2 = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_{\text{ср}}^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha \cdot \omega^3 \cdot i \cdot \rho \cdot (R^3 - r^3) \cdot c \cdot \psi \cdot \varphi \cdot f, \quad (1.10)$$

где  $f$  – коэффициент трения материала о металлическую лопасть.

Составляющая  $N_3$  определяется из выражения:

$$N_3 = \frac{2}{5} \cdot \pi \cdot c \cdot \psi \cdot \varphi \cdot \text{tg}^2 \alpha \cdot \omega^3 \cdot i \cdot \rho \cdot (R^3 - r^3). \quad (1.11)$$

Последняя составляющая  $N_4$  определяется по формуле:

$$N_4 = \frac{1}{4} \cdot c \cdot \varphi \cdot \omega^3 \cdot k \cdot \rho \cdot b' \cdot (R_1^4 - r_1^4), \quad (1.12)$$

где  $k$  – количество кронштейнов, шт.;

$b'$  – ширина кронштейна, м.

Вышеуказанные выражения позволяют достаточно точно определить мощность, потребляемую приводом лопастного смесителя. Однако, наибольшую сложность вызывает определение коэффициента сопротивления движению лопасти  $c$ . Как правило, он определяется экспериментальным путем, учитывая ско-

ростные параметры смесителя и физико-механических свойств смеси [51, 53, 68]. Так, при определенных скоростных параметрах смесителя можно выбрать коэффициент  $c$  в зависимости от формы движущегося тела. Эти рекомендации установлены опытным путем и проверены на практике [51].

Для расчета основных конструктивно-технологических параметров лопастных смесителей достаточно широко используется методика, приведенная в [100]. Исходным параметром для расчета лопастных смесителей является производительность  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), которая определяется по формуле:

$$Q = \frac{V \cdot \rho \cdot K_H \cdot K_B}{t_{\text{ц}} \cdot K_K}, \quad (1.13)$$

где  $V$  – объем рабочей камеры смесителя,  $\text{м}^3$ ;

$K_H$  – коэффициент заполнения рабочей камеры смесителя;

$K_B$  – коэффициент использования рабочего времени;

$t_{\text{ц}}$  – время цикла смешивания, с;

$K_K$  – коэффициент, учитывающий объем, занимаемый конструкциями валов с лопастями.

Геометрический объем рабочей камеры смесителя  $V$  определяется при помощи выражения:

$$V = F \cdot L, \quad (1.14)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения рабочей камеры смесителя до уровня центров лопастных валов,  $\text{м}^2$ ;

$L$  – длина рабочей камеры смесителя, м.

Площадь  $F$  рекомендуется определять по формуле:

$$F = 2,86 \cdot R_K^2, \quad (1.15)$$

где  $R_K$  – внутренний радиус днища корпуса, м.

Внутренний радиус корпуса можно определить согласно выражению:

$$R_K = \sqrt[3]{\frac{Q \cdot t_{\text{ц}} \cdot K_K}{709 \cdot \rho \cdot K_H \cdot K_B}}. \quad (1.16)$$

В выражении (1.16) автор [100] использует следующие единицы измерения: для производительности – т/ч, для времени цикла смешивания – мин., для плотности – т/м<sup>3</sup>.

Для двухвальных смесителей, помимо производительности, следует учитывать диаметр установленных шестерен-синхронизаторов на лопастных валах. Выбранный внутренний радиус корпуса  $R_k$  используется для дальнейшего расчета конструктивных и технологических параметров смесителя. Наружный радиус вращения лопасти  $R_{л.н.}$  определяется по формуле:

$$R_{л.н.} = R_k - 0,005. \quad (1.17)$$

Межосевое расстояние между лопастными валами определяется с помощью выражения:

$$B_1 = 1,4 \cdot R_k. \quad (1.18)$$

Высота корпуса смесителя определяется по формуле:

$$H = (2,2 \dots 2,4) \cdot R_k. \quad (1.19)$$

Ширина корпуса смесителя определяется из соотношения:

$$B = 3,4 \cdot R_k. \quad (1.20)$$

Длина рабочей камеры смесителя определяется по формуле:

$$L = \frac{V}{F}. \quad (1.21)$$

Ширина лопасти определяется по формуле:

$$b_l = 0,42 \cdot R_{л.н.}. \quad (1.22)$$

Высота лопасти равна:

$$L_l = 0,5 \cdot R_{л.н.}. \quad (1.23)$$

Шаг установки лопаток на валу определяется с помощью выражения:

$$s_l = 0,75 \cdot R_{л.н.}. \quad (1.24)$$

По приведенной в работе [97] методике частота вращения валов определяется как:

$$n = \frac{0,47 \dots 0,75}{\sqrt{2 \cdot R_{л.н.}}}. \quad (1.25)$$

Расстояние  $l_l$  от торца рабочей камеры смесителя до крайних лопастей при максимальном угле установки лопастей  $\alpha$  определяется по формуле:

$$l_1 = (0,5 \cdot b_d \cdot \sin \alpha) + 0,01. \quad (1.26)$$

Количество лопастей определяется из соотношения:

$$i = 4 \cdot \left( \frac{(L-2 \cdot l_1)}{s_d} + 1 \right). \quad (1.27)$$

Рассмотренные методики позволяют определить основные конструктивные параметры смесителя, его производительность и частоту вращения валов. Однако в случае разработки технического решения, направленного на повышение качества смешивания мелкозернистых сухих смесей, возникает необходимость получения новых математических выражения для расчета основных параметров, характеризующих процесс смешивания, и методики расчёта конструктивно-технологических параметров смесителя.

Анализ математических описаний процесса смешивания показал, что существующие методики опираются на целый ряд неточностей и допущений. Эти неточности связаны с применением коэффициентов, в которые заложены приближенные значения факторов, влияющих на процесс смешивания. Поэтому разработка математических моделей, направленных на более детальное и точное описание процесса смешивания, на текущий момент времени является актуальной задачей [56].

#### 1.4 Цели и задачи научных исследований

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

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

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 задан-

ной 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.

### **1.5 Выводы по главе**

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. В результате анализа математических описаний процессов смешивания в смесителях с горизонтальным расположением валов, установлена необходимость получения математических выражений для расчета основных параметров процесса смешивания при конструктивном совершенствовании рабочих органов и разработки основанной на этих выражениях методики расчета конструктивно-технологических параметров смесителя.
3. Определена цель научных исследований и поставлены задачи для достижения этой цели.

## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ДВУХВАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЯ СО СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Для достижения поставленной цели исследований необходимо найти рациональное техническое решение, направленное на повышение качества сухой строительной смеси. В настоящее время исследователи используют программные продукты, которые на основе математических инструментов позволяют провести имитационное моделирование процессов, происходящих при производстве строительных материалов [11, 45, 62]. С их помощью можно получить предварительные данные по поисковым экспериментам, которые можно использовать в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях.

Для теоретического исследования процесса смешивания сухих компонентов существует несколько часто применяемых математических моделей. К ним следует отнести ячеечную модель, модели идеального вытеснения и смешения, диффузионную модель и другие [79, 101]. Каждая из них обладает рядом достоинств и недостатков. Выбор математической модели зависит от особенностей исследуемого смесителя и его технологических и конструктивных параметров.

### **2.1 Разработка устройства, воздействующего на уплотнение из смешиваемых компонентов, возникающего перед рабочей поверхностью лопасти**

В результате рассмотрения существующих конструкций смесительных машин для производства сухих смесей, установлено, что возникает необходимость повышения однородности и распределения компонентов смеси при ее приготовлении в лопастных смесителях с горизонтальным расположением валов. С учетом рассмотренных особенностей образования уплотнения перед перемещающейся в сухой смеси лопастью [37, 38, 39, 40, 41, 75, 76, 95], для повышения качества смешивания мелкозернистых компонентов предложено техническое решение, позволяющее воздействовать на образующееся уплотнение, деформируя его. Тех-

ническое решение заключается в установке стержневых элементов перед рабочей поверхностью лопасти [58, 59, 62]. Оно предназначено для применения на горизонтальных лопастных смесителях при приготовлении мелкозернистых смесей в различных отраслях промышленности – строительной, химической, пищевой и других.

Назначение устройства – повышение качества сухой смеси за счет установки стержневых элементов, воздействующих на уплотнение из смешиваемых компонентов, возникающее при движении лопасти в сыпучей среде.

Смеситель с установленным устройством в виде стержневых элементов (рисунок 2.1) работает следующим образом. От электродвигателя 1, через муфту 2 вращающийся момент передается на редуктор 3. Далее вращение передается при помощи муфты вала 4.

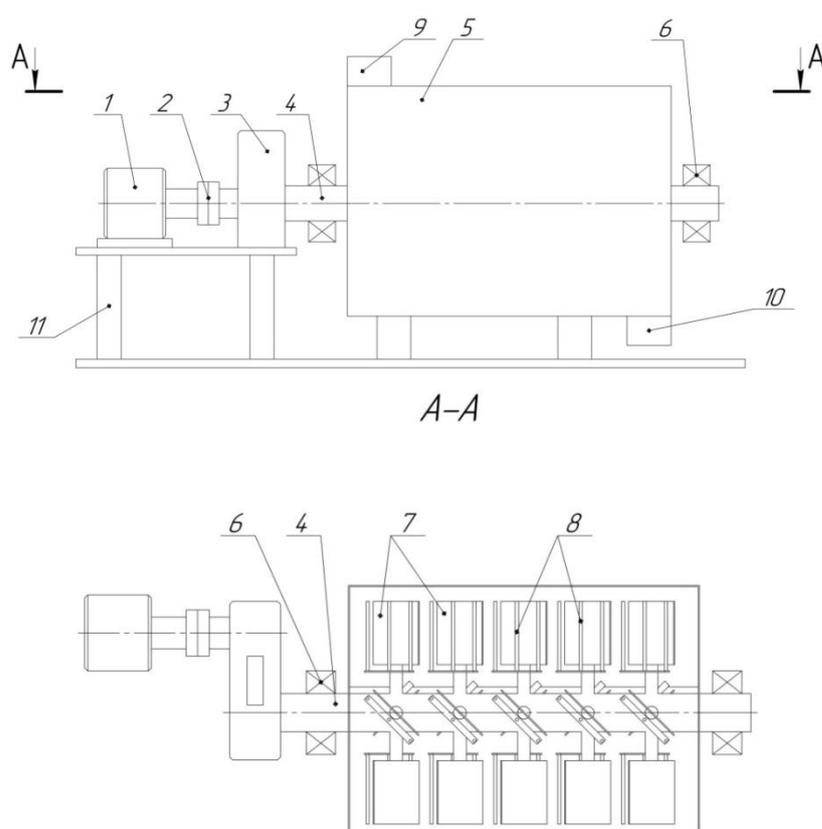


Рисунок 2.1. Схема смесителя с установленными стержневыми элементами:  
 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – лопастной вал; 5 – рабочая камера;  
 6 – подшипники; 7 – лопатки; 8 – стержневые элементы; 9 – загрузочный патрубок;  
 10 – разгрузочный патрубок

Исходные компоненты подаются в рабочую камеру смесителя 5 через загрузочный патрубок 9. Поступившие в рабочую камеру 5 исходные компоненты перемешиваются при помощи лопастей 7, установленных на валу 4.

Перед рабочей поверхностью каждой лопасти 7 установлены стержневые элементы 8. Расстояние между соседними стержневыми элементами должно быть больше, чем максимальный размер наибольшей частицы смешиваемого материала, чтобы избежать появлению застойных зон перед ними. При движении лопасти 7 стержневые элементы 8 разрыхляют и деформируют возникающее уплотнение перед рабочей поверхностью лопасти.

Лопастями 7 не только перемешивают, но и перемещают смешиваемый материал по длине рабочей камеры смесителя 5. Полученная смесь выгружается через разгрузочный патрубок 10.

Предложенное техническое решение позволяет повысить качество приготовленной смеси за счет воздействия стержневых элементов на уплотнение из смешиваемых материалов, возникающее при движении лопасти в смешиваемой среде. Смеситель может эксплуатироваться как в периодическом, так и непрерывном режимах [59].

## **2.2 Поиск конструктивных особенностей технического решения с помощью программного продукта EDEM**

С учетом предложенного технического решения на первом этапе исследований возникла необходимость в поиске конструктивных особенностей стержневых элементов. Для этого проведено имитационное моделирование процессов смешивания двух мелкозернистых компонентов в программной среде EDEM, которая широко используется для моделирования технологических процессов [11, 62, 134]. В качестве характеризующих процесс смешивания параметров рассматривались коэффициент неоднородности смеси,  $V_c$ , %, и время ее приготовления  $t$ , с.

Данные экспериментальные исследования позволили определить рациональную форму стержневых элементов, устанавливаемых перед рабочими по-

верхностями лопастей, их количество, необходимое для обеспечения максимальных показателей однородности смешиваемых компонентов. Поисковые эксперименты с помощью программы EDEM позволили получить данные о положении стержневых элементов относительно лопасти. Также был проведен сравнительный эксперимент по определению коэффициента неоднородности и времени смешивания в смесителе без установленных стержневых элементов и в смесителе со стержневыми элементами с установленными рациональными параметрами в результате поисковых экспериментов.

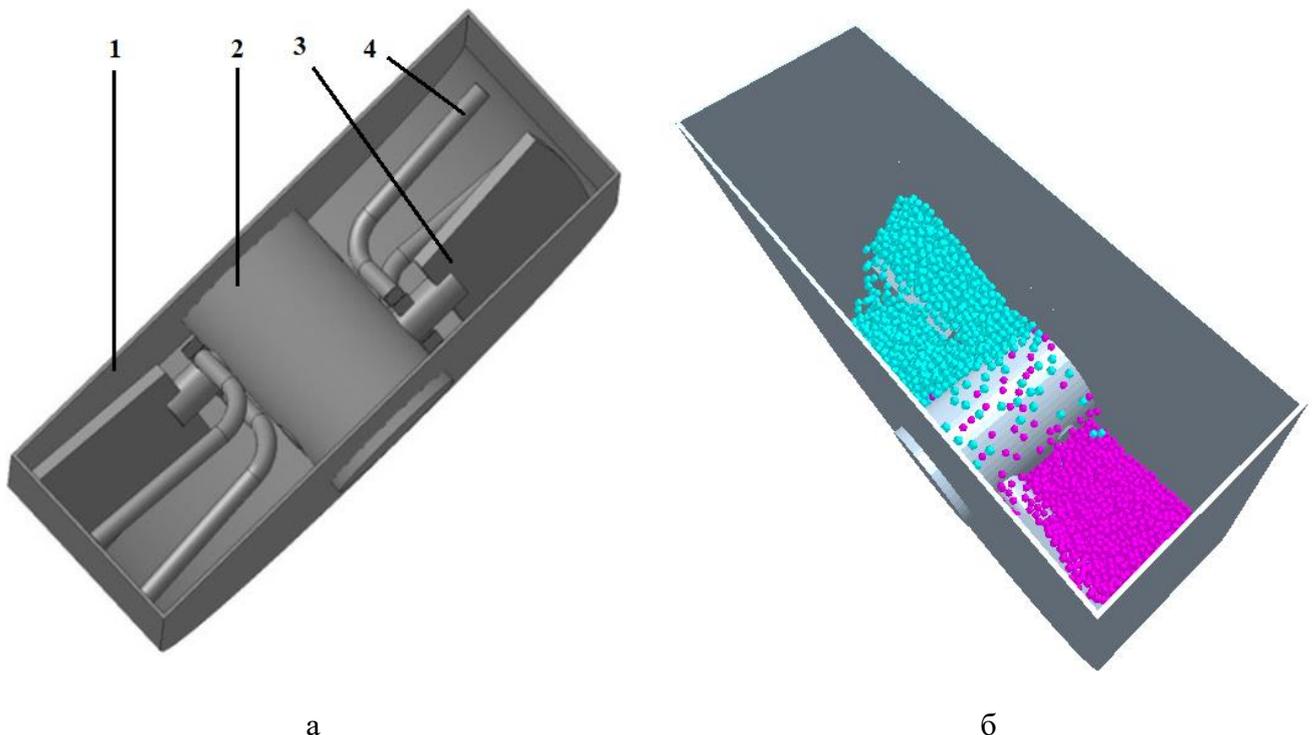
В отличие от поискового эксперимента на физической модели смесителя, программный продукт EDEM позволяет сократить время на проведение эксперимента, а также расходы на создание физической модели смесителя и различные варианты исполнения технического решения. Помимо этого, для проведения эксперимента в реальных условиях понадобится большое количество исходных смешиваемых компонентов, а программная среда EDEM позволяет сгенерировать материал любого размера и требуемых физико-механических свойств [11, 45]. Основным недостатком программной среды является невозможность проведения имитационного моделирования не только для полноразмерной конструкции лопастного смесителя, но и для полноразмерной его модели. Это обусловлено наличием очень большого количества частиц в смешиваемой среде.

Первым этапом поисковых экспериментальных исследований в программной среде EDEM стал поиск рациональной конструкции стержневых элементов. Эксперимент проводился на четырех моделях лопастных горизонтальных смесителей – смеситель без стержневых элементов, смесители с двумя стержневыми элементами круглого, треугольного и квадратного сечений.

Для имитационного моделирования процесса смешивания использовались два компонента. Компонент 1 с размером шарообразных частиц диаметром  $d_{\text{комп.мак1}}=3 \times 10^{-3}$  м и компонент 2 диаметром  $d_{\text{комп.мак2}}=4 \times 10^{-3}$  м. Расстояние между стержневыми элементами, а также между рабочей поверхностью лопасти и стержнями было принято согласно рекомендациям [48]. На протяжении 66 секунд, необходимых для перехода процесса смешивания в установившееся состоя-

ние, проводилось имитационное моделирование процесса смешивания двухкомпонентной смеси при различных частотах вращения лопастных валов  $n_1 = 0,75 \text{ с}^{-1}$ ,  $n_2 = 1,0 \text{ с}^{-1}$  и  $n_3 = 1,5 \text{ с}^{-1}$ .

Для имитации процесса смешивания использовалась модель одновального смесителя с двумя установленными лопастями. Каждая из лопастей перемещала материал в направлениях друг к другу (рисунок 2.2).



а б  
Рисунок 2.2. Цифровая модель корпуса смесителя:  
а – без материала; б – с материалом в момент его загрузки;  
1 – корпус; 2 – вал; 3 – лопасть; 4 – стержневые элементы

В качестве параметров качественной оценки процесса смешивания в программной среде EDEM использовался коэффициент неоднородности  $V_c$  и время  $t$ , необходимое для перехода смеси в устойчивое состояние. Устойчивое состояние – состояние смеси, когда значение коэффициента неоднородности достигает величины, незначительно изменяющейся при продолжении процесса смешивания.

Результаты имитационного моделирования занесены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 Результаты сравнительного имитационного моделирования смешивания сухих компонентов в смесителе со стержневыми элементами различных форм

$j$	Модели смесителей→	Без стержневых элементов		Со стержневыми элементами квадратного сечения		Со стержневыми элементами треугольного сечения		Со стержневыми элементами круглого сечения	
	Частота вращения $n_j, \text{с}^{-1}$	$V_{cj1}, \%$	$t_{j1}, \text{с}$	$V_{cj2}, \%$	$t_{j2}, \text{с}$	$V_{cj3}, \%$	$t_{j3}, \text{с}$	$V_{cj4}, \%$	$t_{j4}, \text{с}$
1	0,75	7,58	56	5,82	60	6,05	63	5,52	61
2	1,0	7,33	54	5,43	58	5,65	60	5,09	58
3	1,5	7,01	51	4,64	58	5,37	58	4,42	57

Для удобства описания данных в таблице введен индекс  $j$ , который обозначает различные скоростные режимы ( $n_j, \text{с}^{-1}$ ) имитационного моделирования. К показателям коэффициента неоднородности и времени смешивания добавлены индексы  $j$ , показывающий при какой частоте вращения  $n$  достигнуты данные показатели, а также порядковый номер, обозначающий модель смесителя. Так модель с индексом «1» – это модель без стержневых элементов, с индексом «2» – это модель со стержневыми элементами квадратного сечения, с индексом «3» – с треугольным и с индексом «4» – с круглым сечениями стержневых элементов.

Анализируя результаты имитационного моделирования, показанные в таблице 2.1, следует заметить, что более быстрый переход смеси в устоявшееся состояние происходит в смесителе без стержневых элементов. Однако значение коэффициента неоднородности готовой смеси гораздо ниже, чем в моделях смесителя со стержневыми элементами различных форм.

При частоте вращения лопастных валов  $n_1 = 0,75 \text{с}^{-1}$  наименьшее значение коэффициента неоднородности  $V_{c14}=5,52 \%$  достигается в смесителе со стержневыми элементами круглого сечения. По сравнению со значением  $V_{c14}$  в моделях смесителей без стержневых элементов значение коэффициента неоднородности больше на 23,2 % ( $V_{c11}=7,58 \%$ ), со стержневыми элементами треугольного сечения больше на 8,8 % ( $V_{c13}=6,05 \%$ ) и со стержневыми элементами квадратного сечения больше на 5,2 % ( $V_{c12}=5,82 \%$ ). Установившееся состояние смеси достигается в смесителе со стержневыми элементами круглого сечения за  $t_{14}=61 \text{с}$ , что на

8,2 % медленнее, чем в смесителе без стержней ( $t_{11}=56$  с), на 1,6 % медленнее, чем в смесителе со стержневыми элементами квадратного сечения ( $t_{12}=60$  с) и на 3,2 % быстрее, чем в смесителе со стержневыми элементами треугольного сечения ( $t_{13}=63$  с).

При частоте вращения лопастных валов  $n_2 = 1 \text{ с}^{-1}$  наименьшее значение коэффициента неоднородности  $V_{c24}=5,09$  % достигается в смесителе со стержневыми элементами круглого сечения. По сравнению со значением  $V_{c24}$  в моделях смесителей без стержневых элементов значение коэффициента неоднородности больше на 30,6 % ( $V_{c21}=7,33$  %), со стержневыми элементами треугольного сечения больше на 9,9 % ( $V_{c23}=5,65$  %) и со стержневыми элементами квадратного сечения больше на 6,3 % ( $V_{c22}=5,43$  %). Установившееся состояние смеси достигается в смесителе со стержневыми элементами круглого и квадратного сечений за  $t_{24} = t_{22}=58$  с, что на 6,9 % медленнее, чем в смесителе без стержней ( $t_{21}=54$  с), и на 3,3 % быстрее, чем в смесителе со стержневыми элементами треугольного сечения ( $t_{23}=60$  с).

При максимальной частоте вращения лопастных валов  $n_3 = 1,5 \text{ с}^{-1}$  наименьшее значение коэффициента неоднородности  $V_{c34}=4,42$  % достигается в смесителе со стержневыми элементами круглого сечения. По сравнению со значением  $V_{c34}$  в моделях смесителей без стержневых элементов значение коэффициента неоднородности больше на 36,9 % ( $V_{c31}=7,01$  %), со стержневыми элементами треугольного сечения больше на 17,7 % ( $V_{c33}=5,37$  %) и со стержневыми элементами квадратного сечения больше на 4,7 % ( $V_{c32}=4,64$  %). Установившееся состояние смеси достигается в смесителе со стержневыми элементами круглого сечения за  $t_{34} = 57$  с, что на 10,5 % медленнее, чем в смесителе без стержней ( $t_{31}=51$  с), и на 1,7 % быстрее, чем в смесителе со стержневыми элементами треугольного и квадратного сечений ( $t_{33} = t_{32}=58$  с).

Согласно полученными данным в таблице 2.1, наименьшее значение коэффициента неоднородности приготавливаемой смеси достигнуто в результате имитационного моделирования в смесителе с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля. Поэтому дальнейшие исследования в программ-

ной среде EDEM проводились на модели смесителя со стержневыми элементами круглого сечения.

С помощью программного продукта EDEM установлено рациональное количество стержневых элементов круглого сечения, необходимое для получения однородной смеси. По аналогии с предыдущим экспериментом, проведен поисковый эксперимент по определению коэффициента неоднородности и времени смешивания. Рассматривались четыре цифровые модели смесителями с разным количеством стержневых элементов – от одного стержня до четырех, установленных перед рабочей поверхностью лопасти. Свойства смешиваемых компонентов, частота вращения лопастных валов и время продолжительности имитационного моделирования были идентичны предыдущему поисковому эксперименту.

Результаты поискового эксперимента в программной среде EDEM по определению рационального количества стержневых элементов цилиндрического профиля представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Результаты сравнительного имитационного моделирования смешивания сухих компонентов в смесителе с различным количеством стержневых элементов цилиндрического профиля

$j$	Модели смесителей→	С одним стержневым элементом		С двумя стержневыми элементами		С тремя стержневыми элементами		С четырьмя стержневыми элементами	
		$V_{cj5}, \%$	$t_{j5}, \text{с}$	$V_{cj6}, \%$	$t_{j6}, \text{с}$	$V_{cj7}, \%$	$t_{j7}, \text{с}$	$V_{cj8}, \%$	$t_{j8}, \text{с}$
1	0,75	5,52	64	3,47	62	4,34	63	5,78	64
2	1,0	5,12	62	3,13	59	3,97	61	5,18	62
3	1,5	4,48	60	2,62	58	3,24	59	4,75	61

Описание результатов, полученных в таблице 2.2 производится по схеме, представленной при описании таблицы 2.1. Единственное изменение касается индексов, обозначающих цифровую модель смесителей. Так модель с индексом «5» – это модель с одним стержневым элементом, с индексом «6» – это модель с двумя стержневыми элементами, с индексом «7» – с тремя и с индексом «8» – с четырьмя стержневыми элементами.

При частоте вращения лопастных валов  $n_1 = 0,75 \text{ с}^{-1}$  наименьшее значение коэффициента неоднородности  $V_{c16} = 3,47 \%$  достигается в цифровой модели сме-

сителя с двумя стержневыми элементами круглого сечения. По сравнению со значением  $V_{c16}$  в моделях смесителей: с одним стержневым элементом значение коэффициента неоднородности больше на 37,1 % ( $V_{c15}=5,52$  %), с тремя стержневыми элементами больше на 20 % ( $V_{c17}=4,34$  %) и с четырьмя стержневыми элементами больше на 40 % ( $V_{c18}=5,78$  %). Установившееся состояние смеси достигается в цифровой модели смесителя с двумя стержневыми элементами за  $t_{16}=62$  с, что на 3,1 % быстрее, чем в смесителе с одним и четырьмя стержневыми элементами ( $t_{15}=t_{18}=64$  с), на 1,6 % быстрее, чем в смесителе с тремя стержневыми элементами ( $t_{17}=63$  с).

При частоте вращения лопастных валов  $n_2 = 1 \text{ с}^{-1}$  минимальное значение коэффициента неоднородности  $V_{c26}=3,13$  % достигается в цифровой модели смесителя с двумя стержневыми элементами круглого сечения. По сравнению со значением коэффициента неоднородности в цифровой модели смесителя с двумя стержневыми элементами, в цифровых моделях смесителей: с одним стержневым элементом значение коэффициента неоднородности больше на 38,9 % ( $V_{c25}=5,12$  %), с тремя стержневыми элементами больше на 21,2 % ( $V_{c27}=3,97$  %) и с четырьмя стержневыми элементами больше на 39,6 % ( $V_{c28}=5,18$  %). Установившееся состояние смеси достигается в цифровой модели смесителя с двумя стержневыми элементами за  $t_{26}=59$  с, что на 4,8 % быстрее, чем в цифровой модели смесителя с одним и четырьмя стержневыми элементами ( $t_{25}=t_{28}=62$  с), на 3,3 % быстрее, чем в модели смесителя с тремя стержневыми элементами ( $t_{27}=61$  с).

При частоте вращения лопастных валов  $n_3 = 1,5 \text{ с}^{-1}$  наименьшее значение коэффициента неоднородности  $V_{c36}=2,62$  % достигается в цифровой модели смесителя с двумя стержневыми элементами круглого сечения. По сравнению со значением  $V_{c36}$ , в моделях смесителей: с одним стержневым элементом значение коэффициента неоднородности больше на 41,5 % ( $V_{c35}=4,48$  %), с тремя стержневыми элементами больше на 19,1 % ( $V_{c37}=3,24$  %) и с четырьмя стержневыми элементами больше на 44,8 % ( $V_{c38}=4,75$  %). Установившееся состояние смеси достигается в цифровой модели смесителя с двумя стержневыми элементами за  $t_{36}=58$  с, что на 3,3 % быстрее, чем в цифровой модели смесителя с одним стержневым

элементом ( $t_{35}=60$  с), на 1,7 % быстрее, чем в модели смесителя с тремя стержневыми элементами ( $t_{37}=59$  с), и на 4,9 % быстрее, чем в цифровой модели смесителя с четырьмя стержневыми элементами ( $t_{38}=61$  с).

Во всех рассматриваемых случаях в цифровой модели смесителя с двумя стержневыми элементами цилиндрического профиля получается более однородная смесь за меньшее время имитационного моделирования процесса смешивания. Исходя из результатов поисковых экспериментов, принято решение исследовать влияние двух стержневых элементов круглой формы на процесс смешивание сухих компонентов.

В результате проведения серий поисковых экспериментов с помощью программной среды EDEM, установлено рациональное положение двух стержневых элементов относительно лопасти. Наиболее эффективным является положение стержневых элементов, когда их вертикальные оси параллельны ближайшим боковым образующим лопасти (рисунок 2.3).

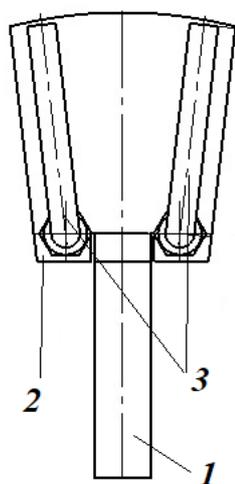


Рисунок 2.3. Рациональное расположение стержневых элементов относительно лопасти:  
1 – кронштейн лопасти; 2 – лопасть; 3 – стержневые элементы

Для оценки эффективности предложенной конструкции горизонтального лопастного смесителя проведено имитационное моделирование процесса смешивания двухкомпонентной смеси в цифровой модели смесителя без стержневых элементов и в цифровой модели смесителя с установленными двумя стержневыми элементами цилиндрического профиля (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4. Цифровые модели корпуса лопастных смесителей:  
а – без материала; б – с материалом

Характеристика результатов имитационного моделирования в сравниваемых цифровых моделях смесителей приведена в таблице 2.3.

Таблица. 2.3. Характеристика моделей смесителей

Исполнение смесителей	Параметр					
	Размеры корпуса		Угол установки лопастей, $\alpha$ , град	Частота вращения валов, $n$ , $\text{с}^{-1}$	Радиус описываемых лопастями окружностей, $R_{\text{л.н.}}$ , м	Расстояние между лопастью и стержнем, $c$ , м
	Длина, $L$ , м	Ширина, $B$ , м				
Без стержневых элементов	0,5	0,288	35	1,2	0,155	-
Со стержневыми элементами	0,5	0,288	35	1,2	0,155	0,02

В цифровые модели смесителей одновременно загружались два компонента шарообразной формы: «Компонент 1» и «Компонент 2». Свойства исходного материала приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Свойства смешиваемых компонентов

Компонент	Характеристика частиц			
	Плотность, $\rho$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Диаметр, $d_{\text{комн}}$ , $1 \times 10^{-3}$ м	Общая масса частиц, $m_{\text{ч}}$ , кг	Цвет
Компонент 1	1900	3	3	
Компонент 2	2000	6	7	

Продолжительность имитационного моделирования составляло 66 секунд, за которое процесс смешивания компонентов переходит в установившийся режим.

На рисунке 2.5 представлены графики изменения коэффициента неоднородности в зависимости от времени смешивания в рассматриваемых цифровых моделях смесителей.

Наиболее интенсивно процессы смешивания компонентов протекают в первые 3...4 с. Изменение коэффициента неоднородности смеси в цифровой модели смесителя со стержневыми элементами на интервале от  $t = 4$  с до  $t = 23$  с характеризуется выраженными колебаниями значений. Аналогичные колебания значений коэффициента неоднородности в цифровой модели смесителя без стержневых элементов наблюдаются на интервале от  $t = 10$  с до  $t = 30$  с. Установившийся процесс смешивания в цифровой модели смесителя со стержневыми элементами достигается при  $t = 60$  с. На временном интервале от  $t=60$  с до  $t = 66$  с среднее значение коэффициента неоднородности смеси составляет  $V_c=3,85$  %. Установившийся процесс смешивания в цифровой модели смесителя без стержневых элементов достигается при  $t = 31$  с. На временном интервале с  $t = 31$  с до  $t = 61$  с среднее значение коэффициента неоднородности составляет  $V_c = 7,06$  % [134].

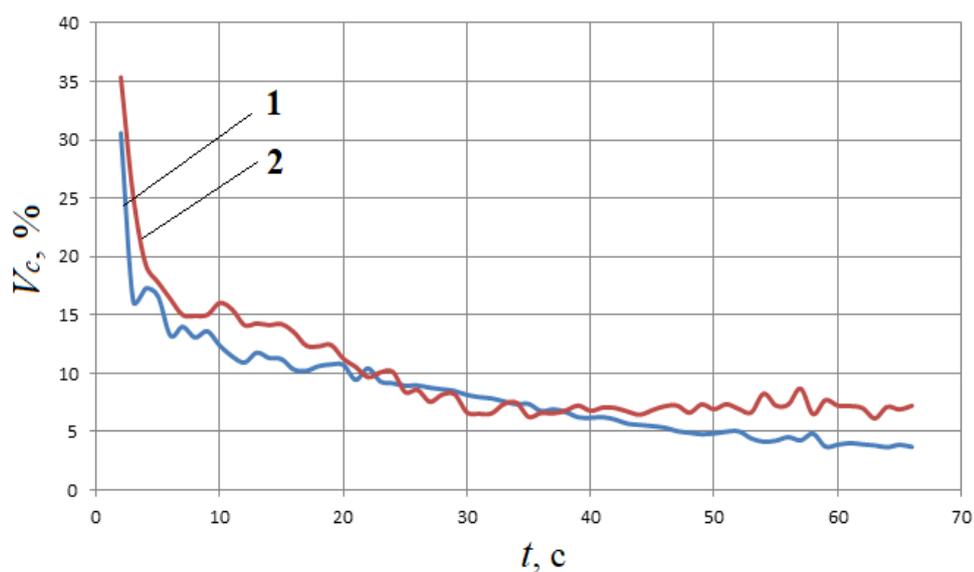


Рисунок 2.5. Зависимость коэффициента неоднородности от времени смешивания в исследуемых цифровых моделях смесителей:

1 – модель со стержневыми элементами; 2 – модель без стержневых элементов

Несмотря на то, что переход в установившийся режим смесеобразования в цифровой модели смесителя без стержневых элементов наступает раньше, чем в цифровой модели смесителя со стержневыми элементами, однородность готовой смеси в цифровой модели смесителя со стержнями, в 2,25 раза выше, чем в цифровой модели смесителя без стержневых элементов.

Имитационное моделирование с помощью программной среды EDEM позволило определить рациональную форму стержневых элементов, их количество, а также положение относительно рабочей поверхности лопасти. В результате поисковых экспериментов определено, что наиболее однородную смесь можно получить в смесителе с установленными двумя стержневыми элементами круглого сечения, вертикальные оси которых параллельны боковым образующим лопастей.

Поисковые эксперименты в программной среде EDEM позволили предварительно подтвердить гипотезу, что техническое решение в виде установки стержневых элементов позволяет повысить однородность готовой смеси. Расположение стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей вносит изменение в характер взаимодействия рабочих органов смесителя со смешиваемым материалом. В этой связи возникает необходимость получения математических выражений для расчета основных параметров, характеризующих процесс смешивания, и разработки основанной на этих выражениях методики расчета его конструктивно-технологических параметров.

### **2.3 Математическое описание по определению концентрации ключевого компонента**

Согласно литературным данным, процесс смешивания сыпучих материалов в лопастных смесителях можно считать линейным. В свою очередь для линейных систем справедлив принцип суперпозиции [79, 101].

Важно отметить еще одно свойство линейных систем – свойство аддитивности, которое позволяет суммировать протекающие независимые процессы.

В рамках диффузионной модели рассмотрим [20, 79, 103] изменение концентрации ключевого компонента  $C$  в среде сыпучего материала в результате его перемешивания лопастью с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля в корытообразном корпусе смесителя (рисунок 2.6).

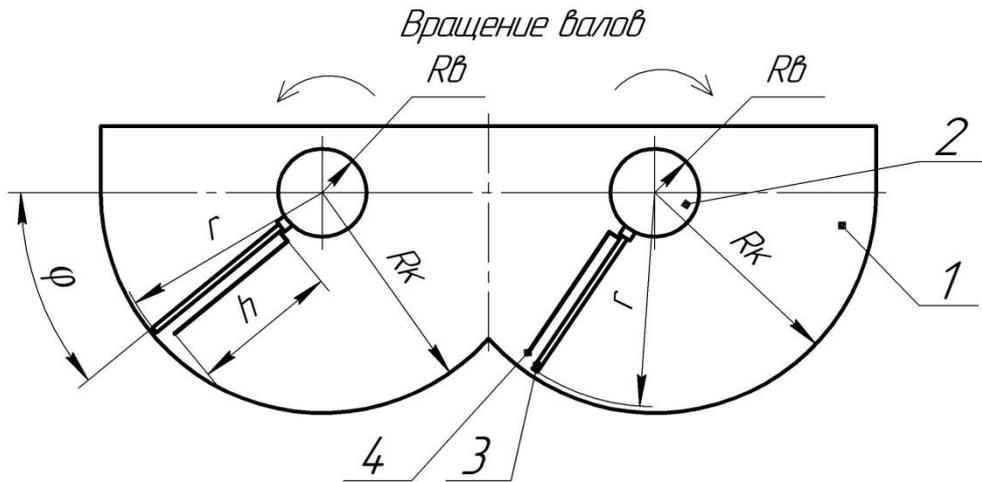


Рисунок 2.6. Схема рабочей камеры смесителя с установленными перед лопастью стержневыми элементами:

- 1 – корытообразный корпус; 2 – вал; 3 – лопатка; 4 – стержневые элементы;
- $h$  – высота стержневых элементов;  $R_k$  – радиус дна корпуса;  $R_b$  – радиус вала;
- $r$  – расстояние от оси вращения;  $\varphi$  – угол поворота лопасти в смешиваемом материале

С учетом существующих рекомендаций рассматривалось изменение концентрации ключевого компонента при поперечном движении смешиваемого материала [79, 101].

Учитывая поперечное перемещение частиц материала, запишем уравнение диффузионной модели в следующем виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\bar{D}_R}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c}{\partial r} \right) \right), \quad (2.1)$$

где  $C=C(t,r)$  – изменение концентрации с течением времени смешивания  $t$  и расстоянием  $r$  от оси вращения;

$\bar{D}_R$  – коэффициент, учитывающий поперечное перемешивание частиц материала,  $\frac{m^2}{c}$ .

На основании свойства аддитивности коэффициент поперечного перемешивания можно представить в виде:

$$\bar{D}_R = \bar{D}_{Rл} + \bar{D}_{Rц}, \quad (2.2)$$

где  $\bar{D}_{Rл}$  – коэффициент, учитывающий вклад лопасти в поперечное перемешивание,  $\frac{м^2}{с}$ ;

$\bar{D}_{Rц}$  – коэффициент, учитывающий вклад в поперечное движение частиц материала двух стержневых элементов цилиндрического профиля,  $\frac{м^2}{с}$ .

Очевидно, что вклад в поперечное передвижение частиц материала в результате вращения лопасти с частотой  $\omega$  пропорционален значению этой частоты и площади активного воздействия лопасти на материал:

$$\bar{D}_{Rл} = S \cdot \sin \alpha \cdot \omega, \quad (2.3)$$

где  $S$  – площадь поверхности лопасти,  $м^2$ ;

$\alpha$  – угол установки лопасти относительно плоскости вращения, рад.

$\omega$  – угловая скорость вращения лопастных валов, рад/с.

Аналогично можно записать следующее соотношение для установленных перед лопастью стержневых элементов цилиндрического профиля:

$$\bar{D}_{Rц} = \frac{1}{2} \cdot (S_{ц1} + S_{ц2}) \cdot \omega, \quad (2.4)$$

где  $S_{ц1}, S_{ц2}$  – соответственно площади поверхности первого и второго стержневых элементов.

В случае равенства геометрических размеров цилиндрических стержневых элементов имеем:

$$\bar{D}_{Rц} = 2 \cdot \pi \cdot R_{ц} \cdot h \cdot \omega, \quad (2.5)$$

где  $h$  – высота установленных стержневых элементов, м;

$R_{ц}$  – радиус установленных стержневых элементов, м.

С учетом (2.3) и (2.5) формула (2.2) примет вид:

$$\bar{D}_R = (S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_{ц} \cdot h) \cdot \omega. \quad (2.6)$$

Подстановка (2.6) в (2.1) приводит к следующему результату:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{(S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot h) \cdot \omega}{r} \cdot \left[ r \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\partial C}{\partial r} \right]. \quad (2.7)$$

Угол поворота лопасти в среде сыпучего материала можно определить по формуле:

$$\varphi = \omega \cdot t, \quad (2.8)$$

где  $t$  – время смешивания, с.

$$r = \beta \cdot \xi, \quad (2.9)$$

где  $\beta$  – переменная, обозначающая выражение  $\sqrt{S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot h}$ , м;

$\xi$  – числовой нормированный коэффициент.

В уравнении (2.7) используем безразмерные переменные согласно соотношениям:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \omega \cdot \frac{\partial C}{\partial \varphi}. \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = \frac{\partial C}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial r} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial C}{\partial \xi}. \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} = \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) \cdot \frac{\partial \xi}{\partial r} = \frac{1}{\beta^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2}. \quad (2.12)$$

Подстановка выражений (2.10) – (2.12) в уравнение (2.7) приводит к следующему результату:

$$\frac{\partial C}{\partial \varphi} = \frac{S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot h}{\beta^2} \cdot \left( \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial C}{\partial \xi} \right). \quad (2.13)$$

Переменная  $\beta$  в (2.9) определяется исходя из выражения (2.13):

$$\beta = \sqrt{S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot h}. \quad (2.14)$$

С учетом соотношения (2.14) уравнение (2.13) примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial C}{\partial \xi}. \quad (2.15)$$

Чтобы решить дифференциальное уравнение (2.15), можно использовать метод Фурье (метод разделения переменных) [44], согласно этому методу вводится функция, описывающая изменение концентрации в виде произведения двух независимых функций  $C_1$  и  $C_2$ . В нашем случае, используя метод разделения переменных, можно записать следующее:

$$C(\varphi, \xi) = C_1(\varphi) \cdot C_2(\xi), \quad (2.16)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – независимые функции.

Подстановка (2.16) в (2.15) приводит к следующему выражению:

$$C_2(\xi) \cdot \frac{dC_1}{d\varphi} = C_1(\varphi) \cdot \left[ \frac{d^2 C_2}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{dC_2}{d\xi} \right]. \quad (2.17)$$

Преобразуем уравнение (2.17):

$$\frac{1}{C_1(\varphi)} \cdot \frac{dC_1}{d\varphi} = \frac{1}{C_2(\xi)} \cdot \left[ \frac{d^2 C_2}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{dC_2}{d\xi} \right]. \quad (2.18)$$

Левая часть уравнения (2.18) зависит от переменной « $\varphi$ », а правая часть от переменной « $\xi$ ». Поэтому каждая из частей в уравнении (2.18) является некоторой постоянной величиной.

$$\frac{1}{C_1(\varphi)} \cdot \frac{dC_1}{d\varphi} = \frac{1}{C_2(\xi)} \cdot \left[ \frac{d^2 C_2}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{dC_2}{d\xi} \right] = -\gamma^2. \quad (2.19)$$

где  $\gamma$  – постоянная величина.

На основании соотношения (2.19) можно получить следующие два уравнения:

$$\frac{1}{C_1(\varphi)} \cdot \frac{dC_1}{d\varphi} = -\gamma^2. \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2 C_2}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{dC_2}{d\xi} = -\gamma^2 \cdot C_2. \quad (2.21)$$

Интегрирование дифференциального уравнения (2.20) приводит к следующему выражению:

$$\ln C_1 = -\gamma^2 \cdot \varphi + \ln C_{10}, \quad (2.22)$$

где  $C_{10}$  – постоянная интегрирования.

На основании (2.22) можно найти, что:

$$C_1 = C_{10} \cdot \exp(-\gamma^2 \cdot \varphi). \quad (2.23)$$

Уравнение (2.21) приведем к следующему виду:

$$\xi^2 \frac{dC_2}{d\xi^2} + \xi \frac{dC_2}{d\xi} + \xi^2 \cdot \gamma^2 \cdot C_2 = 0. \quad (2.24)$$

В дифференциальном уравнении (2.24) выполним замены согласно соотношениям:

$$z = \xi \cdot \gamma. \quad (2.25)$$

$$\frac{dC_2}{d\xi} = \frac{dC_2}{dz} \cdot \frac{dz}{d\xi} = \gamma \cdot \frac{dC_2}{dz}. \quad (2.26)$$

$$\frac{d^2 c_2}{d\xi^2} = \frac{d}{d\xi} \left( \frac{dc_2}{d\xi} \right) = \frac{d}{dz} \left( \gamma \cdot \frac{dc_2}{dz} \right) \cdot \frac{dz}{d\xi} = \gamma^2 \frac{d^2 c_2}{dz^2}. \quad (2.27)$$

Подстановка (2.25) – (2.27) в выражение (2.24) позволяет получить следующее:

$$z^2 \frac{d^2 c_2}{dz^2} + z \frac{dc_2}{dz} + z^2 c_2 = 0. \quad (2.28)$$

С математической точки зрения дифференциальное уравнение (2.28) является уравнением Бесселя [30, 50]. Решением этого уравнения является линейная комбинация цилиндрических функций:

$$C_2(z) = a_1 \cdot J_0(z) + a_2 Y_0(z), \quad (2.29)$$

где  $J_0(z)$  и  $Y_0(z)$  являются функциями Бесселя нулевого порядка соответственного первого и второго рода;

$a_1, a_2$  – произвольные постоянные.

Учитывая, что согласно (2.9), (2.25)  $r \sim \xi \sim z$ , тогда при  $r \rightarrow 0$ ;  $z \rightarrow 0$ , должно выполняться граничное условие:

$$C_2(z = 0) < \infty. \quad (2.30)$$

Условие (2.30) применительно к формуле (2.29) будет выполнено в случае, если:

$$a_2 = 0. \quad (2.31)$$

С учетом (2.31) выражение (2.29) примет вид:

$$C_2(z) = a_1 \cdot J_0(z). \quad (2.32)$$

Подстановка (2.32) и (2.23) в (2.16) позволяет получить следующий результат:

$$C(\varphi, \xi) = const \cdot \exp(-\gamma^2 \cdot \varphi) \cdot J_0(\xi \gamma). \quad (2.33)$$

В свою очередь учет (2.8), (2.9), (2.14) позволяет записать:

$$C(t, r) = const \cdot \exp(-\gamma^2 \cdot \omega \cdot t) \cdot J_0\left(\gamma \cdot \frac{r}{\beta}\right). \quad (2.34)$$

Две произвольные постоянные  $const$  и  $\gamma$  можно найти, если воспользоваться следующими условиями:

$$C(0, R_B) = C_0; \quad (2.35)$$

$$C(0, R_K) = 0, \quad (2.36)$$

где  $C_0$  – исходное значение концентрации ключевого компонента смеси сыпучего материала;

$R_k$  – внутренний радиус цилиндрической части корпуса смесителя;

$R_B$  – радиус лопастного вала.

Применив (2.36) к выражению (2.34), можно получить:

$$0 = const \cdot J_0\left(\gamma \cdot \frac{R_k}{\beta}\right). \quad (2.37)$$

или

$$J_0\left(\gamma \cdot \frac{R_k}{\beta}\right) = 0. \quad (2.38)$$

Решая уравнение (2.38) относительно параметра « $\gamma$ », находим:

$$\gamma \cdot \frac{R_k}{\beta} = \psi_1, \quad (2.39)$$

где  $\psi_1$  – первый корень функции Бесселя  $J_0(z)$ , значение которого приближенно равно [1]:

$$\psi_1 = 2,4048. \quad (2.40)$$

На основании (2.39) находим значение параметра « $\gamma$ »:

$$\gamma = \frac{\beta \cdot \psi_1}{R_k}. \quad (2.41)$$

Подстановка (2.41) в (2.34) позволяет получить следующий результат:

$$C(t, r) = const \cdot \exp\left(-\frac{\beta^2 \cdot \psi_1^2}{R_k^2} \cdot \omega \cdot t\right) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right). \quad (2.42)$$

Применив условие (2.35) к формуле (2.42), находим:

$$C_0 = const \cdot J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right). \quad (2.43)$$

Из соотношения (2.43) находим:

$$const = \frac{C_0}{J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right)}. \quad (2.44)$$

Подстановка (2.44), учитывая условие (2.14), позволяет получить окончательное уравнение:

$$C(t, r) = \frac{C_0 \cdot \exp\left(-\frac{S \cdot \sin \alpha + 2\pi R_{II} \cdot h}{R_k^2} \cdot \psi_1^2 \cdot \omega \cdot t\right) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right)}. \quad (2.45)$$

Таким образом, выражение (2.45) позволяет определить изменение концентрации ключевого компонента смеси в зависимости от конструктивных ( $S$ ,  $\alpha$ ,  $R_y$ ,  $h$ ,  $R_k$ ) и технологических ( $\omega$ ,  $C_0$ ) параметров смесителя.

Так как в технических характеристиках горизонтальных смесителей скоростная характеристика лопастных валов указывается в оборотах за единицу времени, то угловую скорость вращения  $\omega$  выразим через частоту вращения лопастных валов:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n, \quad (2.46)$$

где  $n$  – частота вращения лопастных валов,  $\text{с}^{-1}$ .

Также необходимо учитывать, что лопасть воздействует только на часть объема смешиваемых компонентов в зоне её установки. Поэтому необходимо ввести коэффициент, учитывающий отношение объема материала, который захватывается лопастью, к полному объему материала, заключенного в зоне установки лопасти. Этот коэффициент можно рассчитать по формуле:

$$k_V = \frac{V_{\text{л}}}{V_3}, \quad (2.47)$$

где  $V_{\text{л}}$  – объем смешиваемого материала, который захватывает лопасть,  $\text{м}^3$ ;

$V_3$  – объем смешиваемого материала, расположенный в зоне установки лопасти,  $\text{м}^3$ .

Значения объемов  $V_{\text{л}}$  и  $V_3$  зависят от геометрических параметров смесителя: от радиуса днища корпуса, площади лопасти и размера пространства, в котором лопасть установлена.

Согласно выражению (2.45), второй сомножитель описывает временную зависимость изменения концентрации ключевого компонента смеси во времени, которая носит экспоненциальный характер. Следовательно, при достаточно длительном времени смешивания (в пределах  $t \rightarrow \infty$ ) значение концентрации ключевого компонента смеси будет стремиться принять предельное конечное (идеальное) значение « $C_k$ ». Поэтому формулу (2.45) с учетом (2.46) и (2.47) можно окончательно привести к следующему виду:

$$C(t, r) = C_k - (C_k - C_0) \cdot \exp \left( - \frac{\frac{k_V \cdot (S \cdot \sin \alpha + 2\pi R_{\text{ц}} \cdot h)}{R_k^2}}{J_0 \left( \frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1 \right)} \cdot \psi_1^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot t \right) \times \\ \times J_0 \left( \frac{r}{R_k} \cdot \psi_1 \right). \quad (2.48)$$

С помощью программного продукта *Maple* выполнены исследования уравнения (2.48) и получены зависимости изменения концентрации ключевого компонента от основных конструктивных и технологических факторов (рисунок 2.5). Для удобства анализа единица измерения угла установки лопастей переведена в градусы.

Зависимости были построены для смесителя, технологические и конструктивные параметры которого были рассчитаны по известной методике [100]. Так, для смесителя с объемом рабочей камеры  $V=1 \text{ м}^3$  и радиусом днища корпуса  $R_k=0,375 \text{ м}$  определены следующие параметры, необходимые для расчета изменения концентрации ключевого компонента: диапазон частоты вращения лопастных валов  $n=0,5 \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$ , диапазон угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha=20 \dots 40^\circ$ , диапазон радиуса установленных стержневых элементов цилиндрического профиля  $R_{\text{ц}}=1 \dots 5 \times 10^{-3} \text{ м}$ , высота стержневых элементов исследовалась в диапазоне от 0 до  $17 \times 10^{-2} \text{ м}$ , высота лопасти  $L_{\text{л}}$  в диапазоне  $0,1 \dots 0,17 \text{ м}$ , ширина лопасти  $b_{\text{л}} = 0,1 \dots 0,13 \text{ м}$ .

В рассматриваемом случае значение  $C_k$  было выбрано исходя из соотношения смешиваемых двух компонентов в пропорциях 1 к 4, т. е. значение конечной (идеальной) концентрации ключевого компонента стремится к  $C_k=0,2$ .

Для удобства описания зависимостей к повторяющимся символам, которые обозначают конструктивно-технологические параметры смесителя, например, частота вращения лопастных валов ( $n$ ), длина лопасти ( $L$ ), время смешивания ( $t$ ) и т.п., принято решение добавить числовые индексы, например,  $n_{11}$ ,  $n_{21}$  и  $n_{31}$ ,  $L_{\text{л}1}$ ,  $L_{\text{л}2}$ ,  $L_{\text{л}3}$  или  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  и т.п. Также при описании рациональных конструктивно-технологических параметров смесителя к обозначениям рассматриваемых параметров добавлен индекс «рац».

Увеличение геометрических параметров лопасти, а именно, её ширины  $b_{л}$  и длины  $L_{л}$ , ведет к снижению концентрации ключевого компонента и приближению её значений к идеальным  $C_k=0,2$  (рисунок 2.7, а). Это объясняется увеличением площади взаимодействия рабочих органов со смешиваемым материалом. При этом увеличивается объем смешиваемых компонентов, захватываемый лопастью. Так при фиксированной длине лопасти  $L_{л1}=0,1$  м и варьируемых значениях ширины лопасти  $b_{л11}=0,1$  м,  $b_{л12}=0,12$  м,  $b_{л13}=0,13$  м концентрация ключевого компонента принимает соответствующие значения:  $C_{11}=0,454$ ,  $C_{12}=0,367$ ,  $C_{13}=0,333$ . Разница между наименьшим и наибольшим значениями концентрации составляет 26,7 %.

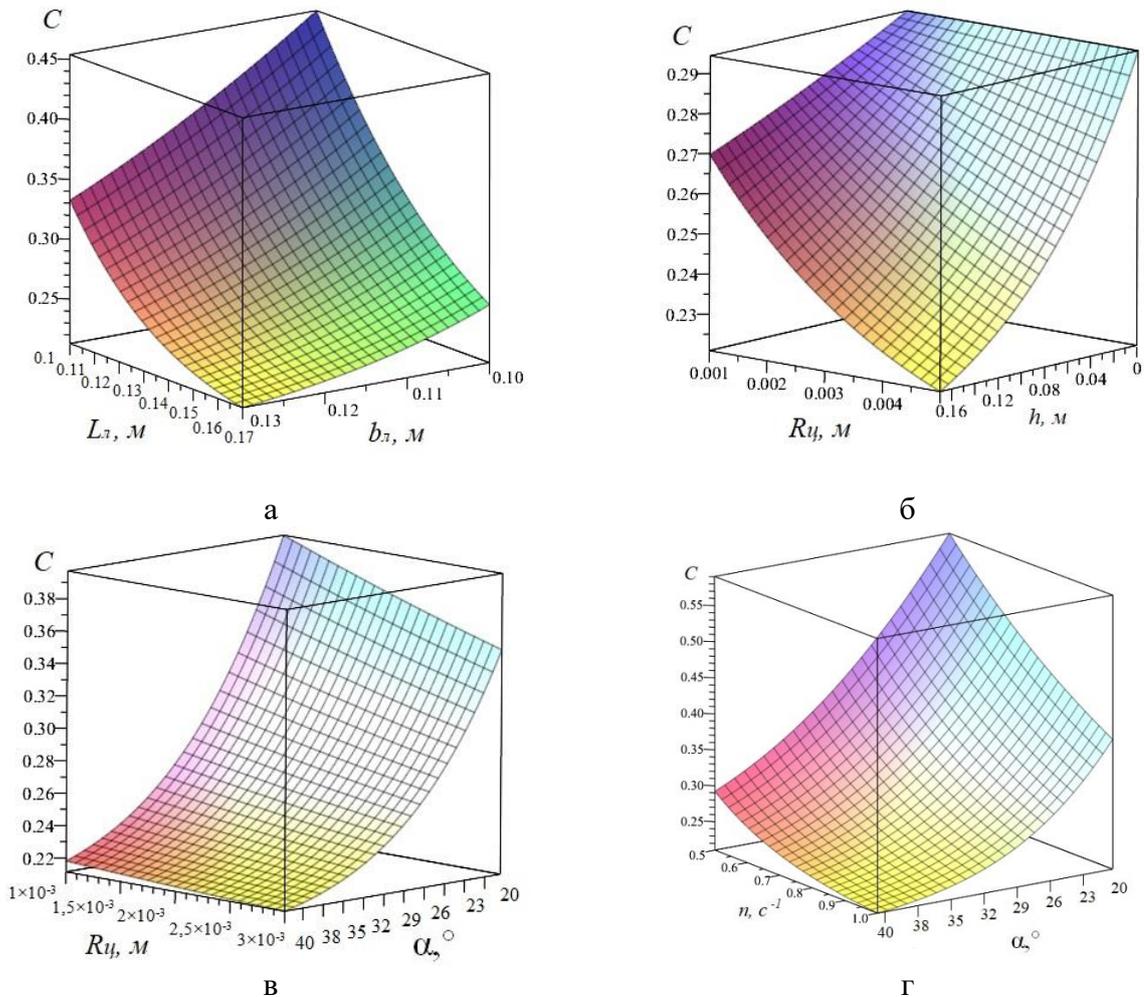


Рисунок 2.7. Зависимости концентрации ключевого компонента от:

- а – высоты  $L_{л}$  и ширины  $b_{л}$  лопасти при  $\alpha=20^\circ$ ,  $t=20$  с и  $n=0,5$  с<sup>-1</sup>; б – радиуса  $R_{ш}$  и высоты  $h$  установленных стержневых элементов при  $t=20$  с,  $\alpha=20^\circ$  и  $n=0,5$  с<sup>-1</sup>;
- в – радиуса  $R_{ш}$  установленных стержневых элементов и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $t=20$  с,  $n=0,5$  с<sup>-1</sup>;
- г – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $t=20$  с,  $L_{л}=0,1$  м  $b_{л}=0,1$  м,  $R_{ш}=0,0025$  м.

При увеличении высоты лопасти до  $L_{л2}=0,135$  м и аналогичных параметрах ширины лопасти  $b_{л}$  концентрация ключевого компонента соответственно будет равна:  $C_{21}=0,33$ ,  $C_{22}=0,265$ ,  $C_{23}=0,245$ . Изменение значений концентрации ключевого компонента составляет 25,6 %. При максимальной длине лопасти  $L_{л3}=0,17$  м и исследуемых значениях ширины лопасти концентрация ключевого компонента соответственно примет следующие значения:  $C_{31}=0,261$ ,  $C_{32}=0,223$ ,  $C_{33}=0,213$ . Значения концентрации изменяются на 18,4 %.

На рисунке 2.7, б показана зависимость концентрации ключевого компонента от радиуса  $R_{ц}$  и высоты  $h$  установленных стержневых элементов цилиндрического профиля. С увеличением варьируемых параметров концентрация ключевого компонента понижается. Как в случае с шириной и высотой лопасти, это объясняется повышением площади контакта смешиваемых компонентов с рабочими органами, что приводит к интенсификации процесса смешивания. Так, при фиксированном значении  $R_{ц1}=0,001$  м и варьируемых параметрах высоты установленных стержневых элементов  $h_{11}=0$  м,  $h_{12}=0,085$  м,  $h_{13}=0,17$  м концентрация ключевого компонента соответственно будет равна:  $C_{41}=0,294$ ,  $C_{42}=0,281$ ,  $C_{43}=0,270$ . Изменение концентрации ключевого компонента составляет 8,16 %. С увеличением радиуса до  $R_{ц2}=0,003$  м и аналогичных значениях высоты установленных стержневых элементов, концентрация ключевого компонента примет соответственно следующие значения:  $C_{51}=0,294$ ,  $C_{52}=0,260$ ,  $C_{53}=0,238$ . Значения изменяются на 19 %. При максимальном значении  $R_{ц3}=0,005$  м и рассматриваемых значениях высоты стержневых элементов концентрация ключевого компонента принимает соответственно следующие значения:  $C_{61}=0,294$ ,  $C_{62}=0,244$ ,  $C_{63}=0,221$ . Процентная разница между максимальным и минимальным значениями составляет 24,8 %.

При равенстве одного из рассматриваемых параметров  $R_{ц}$  и/или  $h$  нулю, концентрация ключевого компонента принимает максимальные значения относительно значения конечной концентрации  $C_{к}=0,2$ . Так во всех рассматриваемых случаях, когда высота стержневых элементов  $h=0$ , концентрация  $C$  принимает наибольшее значение ( $C_{41}=C_{51}=C_{61}=0,294$ ). Поэтому, следует сделать вывод, что в

смесителе без стержневых элементов процесс смешивания происходит менее эффективно, чем в предложенной новой конструкции смесителя.

Зависимость концентрации ключевого компонента от угла установки лопасти  $\alpha$  относительно плоскости вращения и радиуса  $R_{ц}$  установленных стержневых элементов показана на рисунке 2.7, в. Стоит отметить, что с увеличением угла  $\alpha$  концентрация ключевого компонента понижается. Это связано с увеличением проекции лопасти на плоскость вращения и увеличении площади контакта со смешиваемыми компонентами, вследствие чего увеличивается объем перемещаемого материала. Так при фиксированном значении  $R_{ц1}=0,001$  м и варьируемых параметрах угла установки лопасти  $\alpha_1=20^\circ$ ,  $\alpha_2=30^\circ$ ,  $\alpha_3=40^\circ$  концентрация ключевого компонента соответственно примет значения:  $C_{71}=0,397$ ,  $C_{72}=0,244$ ,  $C_{73}=0,218$ . Разница между значениями  $C_{71}$  и  $C_{73}$  составляет 45,1 %. При увеличении радиуса до  $R_{ц4}=0,002$  м и выбранных значениях угла  $\alpha$ , концентрация ключевого компонента соответственно будет равна:  $C_{81}=0,372$ ,  $C_{82}=0,236$ ,  $C_{83}=0,214$ . Значения концентрации ключевого компонента изменяются на 42,5 %. При максимальном  $R_{ц2}=0,003$  м и исследуемом диапазоне угла  $\alpha$ , концентрация ключевого компонента соответственно составит:  $C_{91}=0,350$ ,  $C_{92}=0,229$ ,  $C_{93}=0,211$ . Разница между максимальным и минимальным значениями концентрации ключевого компонента составляет 39,71 %.

Зависимость концентрации ключевого компонента от частоты  $n$  и угла  $\alpha$  показана на рисунке 2.7, г. При повышении частоты вращения и увеличении угла установки лопасти происходит снижение концентрации ключевого компонента. Это объясняется увеличением частоты воздействия на смешиваемые компоненты рабочими органами смесителя, а также повышением объема захватываемого материала лопастью, при увеличении угла её установки относительно плоскости вращения. При фиксированном значении частоты  $n_1=0,5$  с<sup>-1</sup> и варьируемых параметрах угла установки лопасти  $\alpha_1=20^\circ$ ,  $\alpha_2=30^\circ$ ,  $\alpha_3=40^\circ$  концентрация ключевого компонента принимает соответственно следующие значения:  $C_{101}=0,591$ ,  $C_{102}=0,401$ ,  $C_{103}=0,292$ . Разница между наибольшим и наименьшим значениями концентрации составляет 50,59 %. При повышении частоты вращения до

$n_2=0,75 \text{ с}^{-1}$  и рассматриваемых значениях угла  $\alpha$  концентрация принимает соответственно значения  $C_{111}=0,473$ ,  $C_{112}=0,301$ ,  $C_{113}=0,231$ . Разница между значениями концентрации  $C_{111}=0,473$  и  $C_{113}=0,231$  составляет 51,16 %. При максимальной частоте вращения  $n_3=1,0 \text{ с}^{-1}$  и выбранных значениях угла  $\alpha$  концентрация принимает следующие значения соответственно:  $C_{121}=0,391$ ,  $C_{122}=0,251$ ,  $C_{123}=0,211$ . Разница между наибольшим и наименьшим значениями концентрации составляет 46,04 %.

Таким образом, с использованием разработанного математического выражения (2.48) для рассмотренных вариантов исполнения смесителя с установленными стержневыми элементами при приготовлении цементно-песчаной смеси проведены исследования зависимости концентрации ключевого компонента  $C_k$  от его конструктивных и технологических параметров. Установлено, что минимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{\min}^c=0,206$  достигается при следующих рациональных значениях конструктивно-технологических параметров:  $L_{\text{л.рац.}}=0,17 \text{ м}$ ,  $b_{\text{л.рац.}}=0,13 \text{ м}$ ,  $R_{\text{ц.рац.}}=0,003 \text{ м}$ , высоты  $h_{\text{рац.}}=0,17 \text{ м}$ ,  $n_{\text{рац.}}=1,0 \text{ с}^{-1}$  и  $\alpha_{\text{рац.}}=40^\circ$ .

## 2.4 Определение времени смешивания

Время  $t_N$ , за которое лопасть совершает  $N$  полных оборотов в объеме смешиваемых компонентов можно определить по формуле:

$$t_N = N \cdot T, \quad (2.49)$$

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

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (2.50)$$

Подстановка (2.50) в (2.49) дает следующее соотношение:

$$t_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{\omega}. \quad (2.51)$$

Используя выражения (2.48) и (2.51), можно вычислить изменение концентрации ключевого компонента смеси  $C_N$  за  $N$  оборотов лопасти:

$$C_N = C_k - (C_k - C_0) \cdot \exp(-2 \cdot \pi \cdot x \cdot N) \cdot \frac{J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right)}, \quad (2.52)$$

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

В выражении (2.52) использовано следующее обозначение:

$$x = \frac{k_V \cdot S \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ц}} \cdot h}{R_k^2} \cdot \psi_1^2. \quad (2.53)$$

Обозначим отношение идеального значения конечной концентрации  $C_k$  к начальному значению через « $q$ »:

$$q = \frac{C_k}{C_0}. \quad (2.54)$$

Обозначим через  $\alpha_0$  отношение концентрации  $C_N$  к конечному идеальному значению  $C_k$ :

$$\alpha_0 = \frac{C_N}{C_k}. \quad (2.55)$$

На основании соотношения (2.54) и (2.55) получим следующее соотношение:

$$C_N = \alpha_0 \cdot q \cdot C_0. \quad (2.56)$$

С учетом (2.55) и (2.56) формула (2.52) примет вид:

$$\alpha_0 \cdot q = q - (q - 1) \cdot \exp(-2 \cdot \pi \cdot x \cdot N) \cdot \frac{J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right)}. \quad (2.57)$$

Выражение (2.57) можно привести к следующему виду:

$$\frac{q \cdot (\alpha_0 - 1) \cdot J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{(1 - q) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)} = \exp(-2 \cdot \pi \cdot x \cdot N). \quad (2.58)$$

На основании (2.58) находим:

$$N = \frac{\ln\left[\frac{(1 - q) \cdot J_0\left(\frac{r}{R_k} \cdot \psi_1\right)}{q \cdot (\alpha_0 - 1) \cdot J_0\left(\frac{R_B}{R_k} \cdot \psi_1\right)}\right]}{2 \cdot \pi \cdot x}. \quad (2.59)$$

Подстановка (2.59) в (2.51) с учетом частоты вращения лопастных валов позволяет преобразовать выражение (2.49), определяющее время полного совершения оборотов лопасти в среде смешиваемых компонентов  $t_N$ , в выражение для

определения времени смешивания  $t$ , необходимого для достижения сухой смеси заданной концентрации ключевого компонента:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{(1-q)J_0\left(\frac{r}{R_k}\psi_1\right)}{q(\alpha_0-1)J_0\left(\frac{R_B}{R_k}\psi_1\right)}\right)}{x \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}. \quad (2.60)$$

Рассмотрим определение времени подготовки двухкомпонентной цементно-песчаной смеси с соотношением цемента и песка как 1 к 4 в двухвальном смесителе с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля перед лопастями. Зададим значение конечной концентрации, к которой должна стремиться сухая смесь, отличной от идеальной 0,2, например,  $C_k=0,215$ . Принимаем объем рабочей камеры двухвального смесителя периодического действия  $V=1 \text{ м}^3$  и радиус днища корпуса  $R_k=0,375 \text{ м}$ . Согласно методике расчета конструктивных параметров [100] смеситель будет иметь следующие характеристики: наружный радиус, описываемый лопастью смесителя  $R_{л.н.}=0,37 \text{ м}$ ., ширина лопасти  $b_{л.} = 0,12 \text{ м}$ ., высота лопасти  $L_{л.} = 0,17 \text{ м}$ ., высота установленных стержневых элементов  $h=0,15 \text{ м}$ ., рассматриваемый диапазон частоты вращения  $n=0,5 \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$ , диапазон угла установки лопасти  $\alpha=20 \dots 40^\circ$ , диапазон радиуса установленных стержневых элементов  $R_{ст.}=1 \dots 7 \times 10^{-3} \text{ м}$ .

С помощью программного продукта *Maple* выполнены исследования уравнения (2.60) и продемонстрированы графические зависимости времени смешивания, необходимого для получения смеси с заданной концентрации ключевого компонента, в двухвальном лопастном смесителе с установленными стержневыми элементами перед лопастями от конструктивных и технологических параметров (рисунок 2.8).

На рисунке 2.8, а изображена зависимость времени смешивания  $t$  от частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  относительно плоскости вращения. Анализируя изменения функции, можно сделать вывод, что при увеличении значений частоты вращения лопастных валов и угла установки лопастей время на подготовку смеси уменьшается. Это объясняется тем, что при повышении частоты вращения  $n$  увеличивается частота воздействия лопастей с установ-

ленными стержневыми элементами на смешиваемые компоненты. В результате время, необходимое для достижения заданной концентрации смеси, понижается. При повышении значений угла установки лопастей  $\alpha$  увеличивается площадь рабочей поверхности лопаток, контактирующих со смешиваемым материалом, позволяя перемещать в рабочей камере больший объем смеси, что приводит к повышению интенсивности массообменного процесса и снижению времени подготовки смеси.

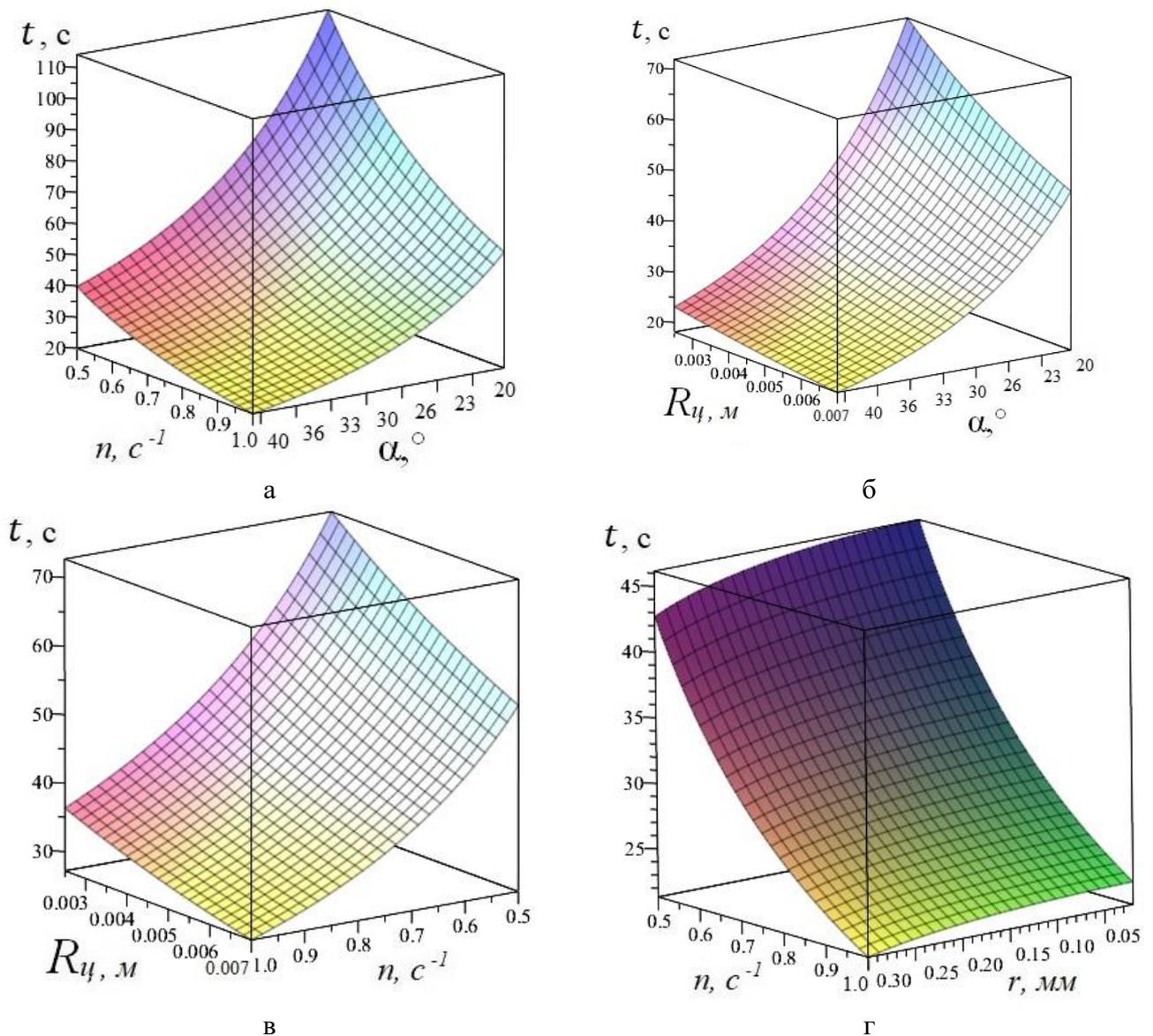


Рисунок 2.8. Зависимость времени смешивания  $t$  при  $C_k=0,215$  от:

- а – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $R_{ц}=0,005$  м;
- б – радиуса установленных стержневых элементов  $R_{ц}$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $n=1$   $\text{с}^{-1}$ ;
- в – радиуса установленных стержневых элементов  $R_{ц}$  и частоты вращения лопастных валов  $n$ , при  $\alpha=30^\circ$ ;
- г – частоты вращения лопастных валов  $n$  и расстояния от оси вращения  $r$ , при  $R_{ц}=0,025$  м и  $\alpha=40^\circ$ .

При варьируемых значениях частоты вращения лопастных валов  $n_1=0,5 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_2=0,75 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_3=1,0 \text{ с}^{-1}$  и фиксированном угле установки лопастей  $\alpha_1=20^\circ$  время  $t$ , затрачиваемое на достижение двухкомпонентной смесью заданной концентрации ключевого компонента, принимает соответственно следующие значения:  $t_{11}=114 \text{ с}$ ;  $t_{12}=77 \text{ с}$ ;  $t_{13}=57 \text{ с}$ . Разница между максимальным  $t_{11}$  и минимальным значением  $t_{13}$  составляет 50 %. При тех же значениях частоты вращения лопастных валов и увеличении угла установки лопастей до  $\alpha_2=30^\circ$  время смешивания соответственно примет значения  $t_{14}=60 \text{ с}$ ;  $t_{15}=41 \text{ с}$ ;  $t_{16}=31 \text{ с}$ . Разница между максимальным  $t_{14}$  и минимальным значением  $t_{16}$  составляет 48 %. При максимальном угле  $\alpha_3=40^\circ$  и аналогичных значениях частоты вращения валов время смешивания принимает соответственно значения:  $t_{17}=39 \text{ с}$ ;  $t_{18}=27 \text{ с}$ ;  $t_{19}=20 \text{ с}$ . Разница между максимальным  $t_{17}$  и минимальным значением  $t_{19}$  составляет 49 %.

На рисунке 2.8, б представлена зависимость времени подготовки смеси  $t$  от угла установки лопасти  $\alpha$  и радиуса установленных стержневых элементов  $R_{ц}$ . С повышением значений радиуса установленных стержневых элементов время, затрачиваемое на подготовку смеси, понижается. Это объясняется тем, что с увеличением радиуса стержневых элементов повышается площадь их контакта со смешиваемым материалом, а также зона их влияния на образующееся уплотнение из смешиваемых компонентов перед рабочей поверхностью лопасти. В связи с этим происходит интенсификация процесса смешивания и снижение времени подготовки смеси.

Так, при фиксированном значении  $R_{ц4}=0,0025 \text{ м}$  и варьируемых значениях угла  $\alpha_1=20^\circ$ ,  $\alpha_2=30^\circ$ ,  $\alpha_3=40^\circ$  время подготовки смеси соответственно будет иметь следующие значения:  $t_{21}=72 \text{ с}$ ;  $t_{22}=37 \text{ с}$ ;  $t_{23}=23 \text{ с}$ . Разница между максимальным и минимальным значениями времени смешивания составляет 49 с. При аналогичных значениях угла установки лопастей и повышении радиуса установленных стержневых элементов до  $R_{ц3}=0,005 \text{ м}$  значения времени подготовки смеси составят соответственно:  $t_{24}=57 \text{ с}$ ;  $t_{25}=31 \text{ с}$ ;  $t_{26}=20 \text{ с}$ . Разница между максимальным и минимальным значениями времени на подготовку однородной смеси составляет 37 с. При максимальном радиусе установленных стержневых элементов

$R_{ц5}=0,007$  м и тех же значениях угла установки лопасти время, затрачиваемое на подготовку смеси, будет соответственно равно:  $t_{27}=49$  с;  $t_{28}=27$  с;  $t_{29}=18$  с. Разница между максимальным и минимальным значениями времени на подготовку однородной смеси составляет 31 с.

На рисунке 2.8, в, показана зависимость времени, необходимого для достижения заданной концентрации ключевого компонента, от радиуса установленных стержневых элементов и частоты вращения лопастных валов.

Так, при изменяющихся значениях радиуса установленных цилиндрических стержневых элементов  $R_{ц4}=0,0025$  м;  $R_{ц3}=0,005$  м;  $R_{ц5}=0,007$  м и минимальном значении частоты вращения лопастных валов  $n_1=0,5$  с<sup>-1</sup>, значения времени подготовки смеси соответственно будут следующими:  $t_{31}=73$  с;  $t_{32}=61$  с;  $t_{33}=55$  с. Разница между максимальным и минимальным значениями времени на подготовку однородной смеси составляет 25 %. При увеличении частоты вращения до  $n_2 = 0,75$  с<sup>-1</sup> и рассматриваемых параметрах радиуса установленных стержневых элементов, время на подготовку однородной смеси принимает соответственно следующие значения:  $t_{34}=49$  с;  $t_{35}=41$  с;  $t_{36}=36$  с. Разница между максимальным  $t_{34}$  и минимальными  $t_{36}$  значениями времени составляет 27 %. При максимальной частоте вращения  $n_3=1,0$  с<sup>-1</sup> и выбранных диапазонах радиуса установленных стержневых элементов время на подготовку смеси принимает соответственно значения:  $t_{37}=37$  с;  $t_{38}=31$  с;  $t_{39}=27$  с. Разница между максимальным  $t_{37}$  и минимальными  $t_{39}$  значениями времени составляет 27 %.

На рисунке 2.8, г представлена зависимость времени подготовки смеси от частоты вращения лопастного вала и расстояния  $r$  от оси вращения. При увеличении расстояния  $r$  от оси вращения время, затрачиваемое на достижение смесью однородного состояния, снижается. Это объясняется сочетанием двух факторов. Первый фактор заключается в увеличении линейной скорости движения лопаток и стержневых элементов при увеличении радиуса их вращения. Так, линейная скорость рабочих органов на радиусе  $R_{л.внтр.}$ , который описывает внутренняя кромка лопасти, будет меньше, чем скорость рабочих органов на радиусе  $R_{л.н.}$ , описываемый наружной кромкой лопасти. Вторым фактором влияния увеличения

расстояния от оси вращения на уменьшение времени подготовки смеси обусловлен тем, что на максимальном расстоянии от центра вращения траектории движения лопастей двух валов, а также материала, захватываемого лопастями, пересекаются в центральной области рабочей камеры, где происходит вдавливание смешиваемых компонентов друг в друга. Тем самым скорость массообменных процессов в данной области возрастает, по сравнению с областью близкой к поверхности валов. Логично предположить, что состояние смеси следует считать однородным, когда значение концентрации ключевого компонента достигнет близких значений к  $C_k$  при минимальном значении радиуса  $r$  от оси вращения.

Так, при варьируемых значениях частоты вращения валов  $n_1=0,5 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_2=0,75 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_3=1,0 \text{ с}^{-1}$  и фиксированном расстоянии от оси вращения  $r_1=0,02 \text{ м}$  время подготовки смеси принимает соответственно следующие значения:  $t_{41}=46 \text{ с}$ ;  $t_{42}=30 \text{ с}$ ;  $t_{43}=23 \text{ с}$ . Разница между максимальным и минимальным значениями составляет 50 %. При тех же рассматриваемых параметрах частоты вращения и увеличенном расстоянии от оси вращения до  $r_2=0,15 \text{ м}$ , время на подготовку качественной смеси соответственно будет равно:  $t_{44}=45 \text{ с}$ ;  $t_{45}=30 \text{ с}$ ;  $t_{46}=22 \text{ с}$ . Изменения между максимальным и минимальным значениями – 51,1 %. При максимальном значении  $r_3=0,3 \text{ м}$  и аналогичных значениях частоты вращения лопастных валов, время, необходимое для подготовки качественной смеси будет равно соответственно:  $t_{47}=42 \text{ с}$ ;  $t_{48}=28 \text{ с}$ ;  $t_{49}=21 \text{ с}$ . Разница между максимальным  $t_{47}$  и минимальными  $t_{49}$  значениями времени составляют 50 %.

Таким образом, выражение (2.60) позволяет определить необходимое время для достижения заданной концентрации ключевого компонента смеси в зависимости от технологических и конструктивных параметров двухвального лопастного смесителя со стержневыми элементами перед рабочими поверхностями лопастей [117]. С использованием разработанного математического выражения для рассмотренных вариантов исполнения смесителя со стержневыми элементами при приготовлении цементно-песчаной смеси с концентрацией ключевого компонента  $C_k=0,215$  проведены исследования зависимости времени ее подготовки от конструктивных и технологических параметров. Установлено, что наименьшее время

смешивания  $t_{\text{мин.}}=18$  с достигается при следующих рациональных параметрах лопастного смесителя:  $n_{\text{рац}}=1,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $R_{\text{ц.рац.}}=0,007$  м,  $\alpha_{\text{рац}}=40^\circ$ ,  $r_{\text{рац}}=0,3$  м.

## 2.5 Определение мощности, затрачиваемой на процесс смешивания

В основу математического описания мощности привода, затрачиваемой на процесс приготовления смеси в горизонтальном лопастном смесителе с установленными стержневыми элементами, положена существующая методика [17, 81, 82]. Общую мощность привода можно рассчитать по известной формуле [81]:

$$P_{\text{прив}} = \frac{\lambda \cdot (P_{\text{общ}})}{\eta}, \quad (2.61)$$

где  $P_{\text{общ}}$  – общая мощность, затрачиваемая приводом на процесс смешивания материалов, Вт;

$\eta$  – общий КПД привода;

$\lambda$  – коэффициент, учитывающий дополнительные энергетические потери ( $\lambda=1,1\dots 1,3$ ).

Общая мощность без учета дополнительных энергетических потерь и КПД привода согласно [81] состоит из четырех слагаемых:

$$P_{\text{общ}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (2.62)$$

где  $P_1$  – мощность, расходуемая на преодоление лобового сопротивления движению лопасти в среде сыпучих материалов, Вт;

$P_2$  – мощность, расходуемая на преодоление сил трения материала о поверхность лопасти, Вт;

$P_3$  – мощность, которая расходуется на преодоление сил трения материала о стенки корпуса лопастного смесителя, Вт;

$P_4$  – мощность, расходуемая на преодоление сил трения материала о кронштейн крепления лопасти, Вт.

Слагаемые общей мощности  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  точно описываются в существующих аналитических исследованиях и не нуждаются в дополнительном уточнении. Формулы, которые позволяют рассчитать вышеперечисленные слагаемые полной

мощности, будут представлены в конце данного раздела. Формула мощности  $P_l$ , позволяющая учитывать предлагаемые конструктивные изменения рабочих органов смесителя, а именно, установкой перед лопастью стержневых элементов цилиндрического профиля, нуждается в изменении.

Изменение мощности, которая расходуется на преодоление силы сопротивления движению лопасти в сыпучей среде, напрямую связано с изменением коэффициента сопротивления  $c_s$  [27, 111], оказываемого средой на движение лопасти. Логично предположить, что коэффициент сопротивления зависит от следующих двух безразмерных параметров:  $c_s(\varphi, \xi_1)$ :

$$\varphi = \omega \cdot t_{\text{см}}, \quad (2.63)$$

$$\xi_1 = \frac{r_1}{b_l \cdot \sin \alpha}, \quad (2.64)$$

где  $r_1$  – текущее радиальное расстояние, пройденное частичками сыпучего материала вдоль поверхности лопасти, м;

$b_l$  – ширина лопасти, м;

Предположим, что вклад в величину коэффициента сопротивления движению лопасти каждой из величин (2.63) и (2.64) является независимым. На основании этого можно записать:

$$c_s(\varphi, \xi) = c_{s1}(\varphi) \cdot c_{s2}(\xi_1). \quad (2.65)$$

Рассмотрим изменение коэффициента сопротивления при бесконечно малом изменении величин (2.63) и (2.64):

$$dc_{s1} = c_{s1} \cdot d\varphi. \quad (2.66)$$

$$dc_{s2} = c_{s2} \cdot d\xi_1. \quad (2.67)$$

На основании выражения (2.66) можно определить:

$$c_{s1}(\varphi) = a_1 \cdot e^\varphi, \quad (2.68)$$

где  $a_1$  – постоянная интегрирования.

На основании (2.67) находим:

$$c_{s2}(\xi) = a_2 \cdot e^{\xi_1}, \quad (2.69)$$

где  $a_2$  – постоянная интегрирования.

Подстановка (2.68) и (2.69) в формулу (2.65) позволяет получить следующее соотношение:

$$c_s(\varphi, \xi_1) = \text{const} \cdot e^{\varphi + \xi_1}. \quad (2.70)$$

Для нахождения  $\text{const}$  необходимо воспользоваться следующим граничным условием:

$$c_s(\varphi_0, \xi_0) = c_0, \quad (2.71)$$

где  $c_0$  – значение коэффициента сопротивления движению лопасти в воздушной среде [36, 51];

$\varphi_0$  – начальное значение угла входа лопасти в сыпучий материал, рад;

$\xi_0$  – безразмерный числовой параметр.

Безразмерная величина  $\xi_0$  определяется соотношением:

$$\xi_0 = \frac{L_{\text{л}}}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}. \quad (2.72)$$

где  $L_{\text{л}}$  – длина лопасти, м.

Применение граничного условия (2.71) к (2.70) приводит к следующему результату:

$$c_0 = \text{const} \cdot e^{\varphi_0} \cdot e^{\xi_0}. \quad (2.73)$$

На основании (2.73) имеем:

$$\text{const} = c_0 \cdot e^{\varphi_0 - \xi_0}. \quad (2.74)$$

Подстановка (2.74) в (2.70) приводит окончательно к следующему результату:

$$c_s(\varphi, \xi_1) = c_0 \cdot \exp\left(-(\varphi_0 - \varphi) - \frac{L_{\text{л}} - r_1}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right). \quad (2.75)$$

Давление  $p$  частиц материала сыпучей среды на лопасть в направлении её движения можно определить на основании формулы:

$$p = c_s(\varphi, \xi_1) \cdot \rho \cdot v^2, \quad (2.76)$$

где  $\rho$  – насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – линейная скорость движения лопасти, м/с.

Подстановка (2.75) в (2.76) приведет к соотношению:

$$p = c_0 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \exp\left(-(\varphi_0 - \varphi) - \frac{L_{\text{л}} - r_1}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right). \quad (2.77)$$

На основании соотношения (2.77) можно определить  $\bar{p}$  – среднее значение давления, действующего на единицу длины лопасти.

$$\bar{p} = \frac{c_0 \cdot \rho \cdot v^2}{L_l} \int_{r_0}^{r_0+L_l} \exp\left(-(\varphi_0 - \varphi) - \frac{L_l - r_1}{b_l \cdot \sin \alpha}\right) dr_1, \quad (2.78)$$

где  $r_0$  – высота кронштейна лопасти, м.

Вычисление интеграла (2.78) приводит к следующему результату:

$$\bar{p} = \frac{c_0 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot e^{-(\varphi_0 - \varphi)} \cdot b_l \cdot \sin \alpha}{L_l} \cdot e^{-(\varphi_0 - \varphi)} \left( e^{\frac{r_0}{b_l \cdot \sin \alpha}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{L_l - r_0}{b_l \cdot \sin \alpha}} \right) \right). \quad (2.79)$$

Для определения величины элементарной силы сопротивления движению лопасти в сыпучей среде выделим на поверхности лопасти элементарную площадку (рисунок 2.9).

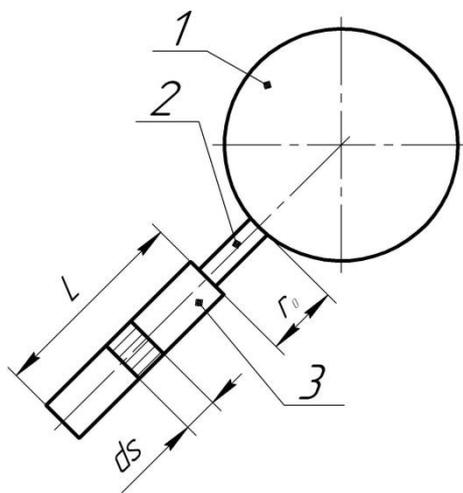


Рисунок 2.9. Схема для расчета элементарной работы по перемещению сыпучего материала лопастью смесителя:

1 – вал; 2 – кронштейн лопасти; 3 – лопасть

Согласно расчетной схеме, определим площадь элементарной поверхности лопасти, участвующей в перемещении смешиваемых компонентов:

$$dS = b_l \cdot \sin \alpha \cdot dr_1. \quad (2.80)$$

Величина окружной скорости выделенной площадки (2.80) будет определяться соотношением:

$$v_r = \omega \cdot r_1. \quad (2.81)$$

На основании соотношений (2.79)-(2.81) находим величину элементарной силы сопротивления, оказываемой сыпучим материалом элементарной площадке (2.78):

$$df = \bar{p}dS = \frac{c_0 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b_{\text{л}}^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \exp(-(\varphi_0 - \varphi) + \frac{r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha})}{L_{\text{л}}} \times \\ \times \left(1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right)\right) \cdot r_1^2 dr_1. \quad (2.82)$$

При перемещении лопасти вдоль элементарного участка дуги

$$dl = r_1 d\varphi, \quad (2.83)$$

будет совершаться элементарная работа « $dA$ » по преодолению элементарной силы сопротивления (2.82):

$$dA = \frac{c_0 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b_{\text{л}}^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \exp(-(\varphi_0 - \varphi) + \frac{r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha})}{L_{\text{л}}} \times \\ \times \left(1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right)\right) \cdot r_1^3 dr_1 d\varphi. \quad (2.84)$$

На основании полученного соотношения (2.84) можно найти полную работу силы лобового сопротивления лопасти при её движении в объеме, заполненном сыпучим материалом.

$$A = \frac{c_0}{L_{\text{л}}} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b_{\text{л}}^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \exp\left(\frac{r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right)\right) \times \\ \times \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\text{к}}} \exp(\varphi_0 - \varphi) d\varphi \int_{r_0}^{r_0 + L_{\text{л}}} r_1^3 dr_1, \quad (2.85)$$

где  $\varphi_{\text{к}}$  – значение угла, при котором лопасть выходит из объема сыпучего материала, рад.

Вычисление интегралов в формуле (2.85) приводит к следующему результату:

$$A = \frac{c_0}{4 \cdot L_{\text{л}}} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b_{\text{л}}^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot ((r_0 + L_{\text{л}})^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right) \times \\ \times (1 - \exp(\varphi_{\text{к}} - \varphi_0)) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{b_{\text{л}} \cdot \sin \alpha}\right)\right). \quad (2.86)$$

Введем следующие обозначения:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{к}} - \varphi_0, \quad (2.87)$$

$$\Delta\varphi = \omega \cdot t_{\text{к}}, \quad (2.88)$$

где  $t_{\text{к}}$  – время воздействия лопасти на сыпучий материал в объеме смесителя, с.

Мощность, затрачиваемая на преодоление лопастью лобового сопротивления при её движении в объеме сыпучего материала, определяется соотношением:

$$P = A \cdot \omega. \quad (2.89)$$

Так как перед рабочей поверхностью лопасти устанавливаются стержневые элементы, то мощность, расходуемая на преодоление сил лобового сопротивления, будет состоять из двух слагаемых:

$$P_{л.с.} = P_{л.с.1} + P_{л.с.2}, \quad (2.90)$$

где  $P_{л.с.1}$  – величина мощности, которая затрачивается на преодоление силы лобового сопротивления рабочей поверхностью лопасти с учетом вычета миделевых сечений установленных стержневых элементов, Вт.

$P_{л.с.2}$  – величина мощности, расходуемой на преодоление сил сопротивления стержневого элемента цилиндрического профиля, Вт.

Мощность, которая расходуется на преодоление силы лобового сопротивления лопасти при её движении в объеме сыпучего материала без учета установленных стержневых элементов, обозначим как  $P_{л.с.0}$ . С учетом выражения (2.86) мощность  $P_{л.с.0}$  можно определить по формуле:

$$P_{л.с.0} = \frac{c_0}{4 \cdot L_{л.}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot b_{л.}^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot ((r_0 + L_{л.})^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{b_{л.} \cdot \sin \alpha}\right) \times \\ \times (-1 + \exp(\omega \cdot t_k)) \cdot (1 - \exp\left(-\frac{L_{л.} - r_0}{b_{л.} \cdot \sin \alpha}\right)). \quad (2.91)$$

На основании формулы (2.91) можно записать выражение, позволяющее определить затрачиваемую мощность  $P_{л.с.1}$ :

$$P_{л.с.1} = \frac{c_0}{4 \cdot L_{л.}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \tilde{b}^2 \cdot ((r_0 + L_{л.})^4 - r_0^4) \times \\ \times \exp\left(\frac{r_0}{\tilde{b}}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot (1 - \exp\left(-\frac{L_{л.} - r_0}{\tilde{b}}\right)), \quad (2.92)$$

здесь величина:

$$\tilde{b} = b_{л.} \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot d_0, \quad (2.93)$$

где  $d_0$  – диаметр установленных стержневых элементов, м.

Выражение (2.92) учитывает уменьшение ширины лопасти при установке перед ней двух стержневых элементов круглой формы сечения.

Мощность, затрачиваемая на преодоление лобового сопротивления сыпучей среды движению стержней цилиндрического профиля, определяется выражением:

$$P_{л.с.2} = \frac{c_1}{4 \cdot L_{л}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_0^2 \cdot ((r_0 + L_{л})^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{d_0}\right) \times \\ \times (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot (1 - \exp\left(-\frac{L_{л}-r_0}{d_0}\right)), \quad (2.94)$$

где  $c_1$  – коэффициент сопротивления цилиндрического стержня в воздушной среде.

Суммарная мощность  $P_{л.с.}$ , затрачиваемая на преодоление сил лобового сопротивления при вращении лопастного вала с  $i$ -ым количеством лопастей и с количеством установленных стержневых элементов  $z_{ст}$  в сыпучей среде материала, при заполнении камеры смешивания до уровня загрузки материалом, не превышающего уровень диаметра, описываемого лопастью, будет определяться по формуле:

$$P_{л.с.} = i \cdot \left(\frac{c_0}{4 \cdot L_{л}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \tilde{b}^2 \cdot ((r_0 + L_{л})^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{\tilde{b}}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \times \right. \\ \times \left. \left(1 - \exp\left(-\frac{L_{л}-r_0}{\tilde{b}}\right)\right)\right) + z_{ст} \cdot \left(\frac{c_1}{4 \cdot L_{л}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_0^2 \cdot ((r_0 + L_{л})^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{d_0}\right) \times \right. \\ \times \left. (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot (1 - \exp\left(-\frac{L_{л}-r_0}{d_0}\right))\right), \quad (2.95)$$

где  $i$  – количество установленных лопастей, шт.;

$z_{ст}$  – количество установленных стержневых элементов, шт.

Составляющие  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$  полной мощности, затрачиваемой на процесс смешивания, в принятых в рассматриваемой работе обозначениях, находятся по следующим известным формулам [81]:

$$P_2 = 0,67 \cdot \pi \cdot R_{ср}^2 \cdot c_{ср} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot (R_{л.н.}^3 - R_{л.внтр.}^3) \cdot i \cdot \psi_d \cdot k_3 \cdot f, \quad (2.96)$$

где  $c_{ср.}$  – коэффициент сопротивления, зависящий от состава и пластичности смеси ( $c_{ср.} = 3...9$ );

$R_{ср}$  – средний радиус вращения лопастей, м;

$R_{л.н.}$  – наружный радиус вращения установленных лопастей, м;

$R_{л.внтр.}$  – внутренний радиус вращения установленных лопастей, м;

$\psi_d$  – коэффициент, зависящий от длины дуги рабочей поверхности лопасти;

$k_3$  – коэффициент заполнения корпуса смесителя;

$f$  – коэффициент трения материала о поверхность лопасти.

$$P_3 = 0,4 \cdot \pi \cdot c_{\text{ср.}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot (R_{\text{к}}^5 - R_{\text{л.н.}}^5) \cdot i \cdot \psi_{\text{д}} \cdot k_3. \quad (2.97)$$

$$P_4 = 0,25 \cdot c_{\text{ср.}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_{\text{к}} \cdot (R_{\text{н.кр.}}^4 - R_{\text{в.кр.}}^4) \cdot i \cdot k_3, \quad (2.98)$$

где  $d_{\text{к}}$  – диаметр кронштейна лопасти, м;

$R_{\text{н.кр.}}$  – наружный радиус вращения кронштейна лопасти, м;

$R_{\text{в.кр.}}$  – внутренний радиус вращения кронштейна лопасти, м.

После подстановки (2.95), (2.96), (2.97), (2.98) в формулу (2.62) получим выражение для определения общей мощности  $P_{\text{общ.}}$ , затрачиваемой на процесс смешивания. Полученное значение общей мощности  $P_{\text{общ.}}$  необходимо подставить в выражение (2.61) и получить мощность, потребляемую приводом двухвального лопастного смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля перед лопастями.

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{л.с.}} + P_2 + P_3 + P_4. \quad (2.99)$$

Рассмотрим расчёт мощности, потребляемой приводом двухвального смесителя с установленными стержневыми элементами перед лопастями. Воспользуемся рассчитанными по методике [100, 116] параметрами смесителя с объемом рабочей камеры  $V=1 \text{ м}^3$  и радиусом днища корпуса  $R_{\text{к}}=0,375 \text{ м}$ . Для расчета мощности смесителя были определены следующие параметры: количество лопастей  $z_{\text{ст}}=38$  шт; количество стержневых элементов  $i=76$  шт.; внутренний радиус, описываемый лопастью смесителя  $R_{\text{л.внтр.}}=0,2 \text{ м}$ ; диаметр кронштейна лопасти  $d_{\text{к}}=0,015 \text{ м}$ ; наружный радиус вращения кронштейна лопасти  $R_{\text{н.кр.}}=0,2 \text{ м}$ ; внутренний радиус вращения кронштейна лопасти  $R_{\text{в.кр.}}=0,04 \text{ м}$ . Плотность приготавливаемой сухой строительной смеси составляет  $\rho=1600 \text{ кг/м}^3$ .

С помощью программного продукта *Maple* произведены исследования уравнения (2.95), позволяющие определить мощность, расходуемую на преодоление сил лобового сопротивления лопасти с установленными стержневыми элементами перед её рабочей поверхностью. В результате были построены зависимости  $P_{\text{л.с.}}$ , представленные на рисунке 2.10.

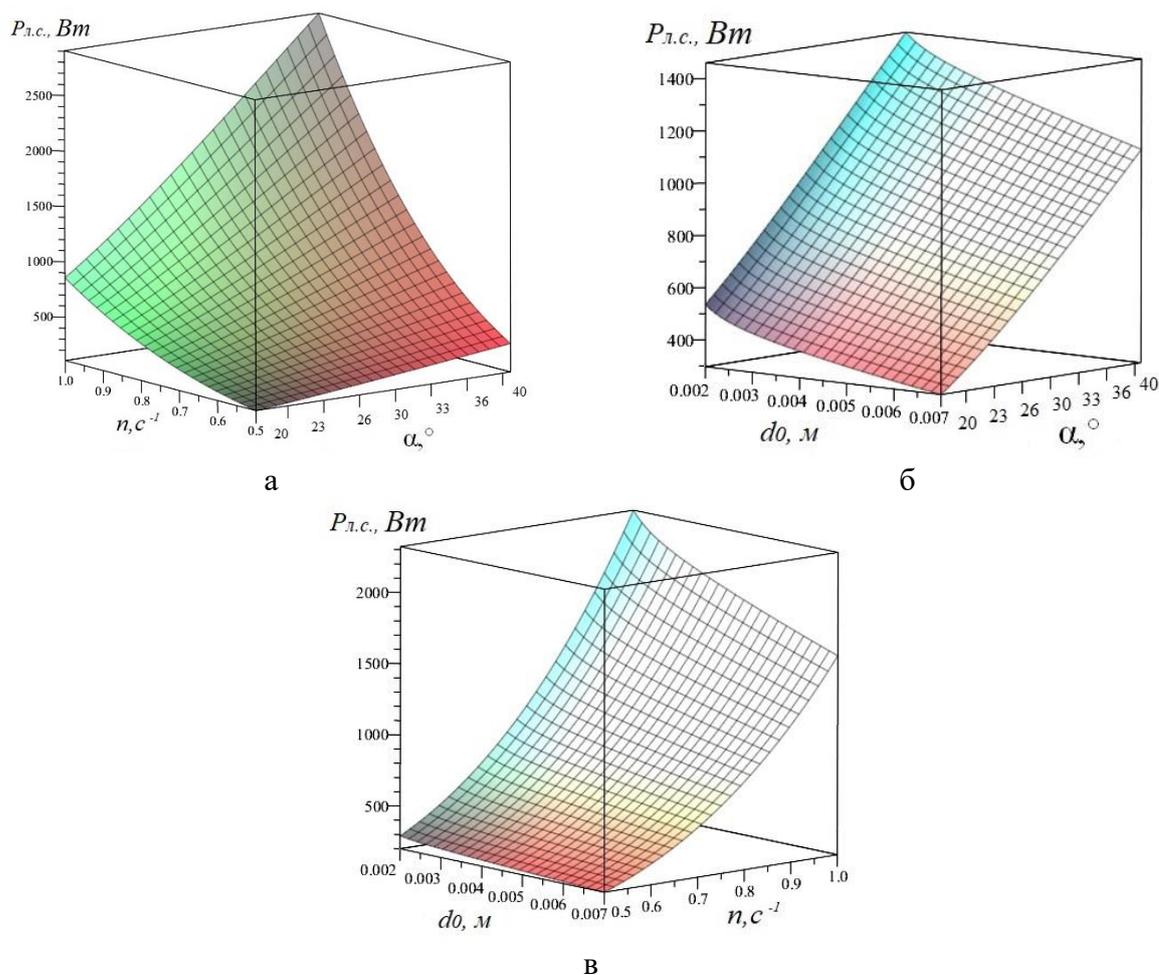


Рисунок 2.10. Зависимость мощности  $P_{л.с.}$ , затрачиваемой на преодоление сил лобового сопротивления движению лопасти с установленными стержневыми элементами от:  
 а – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $d_0=0,005$  м;  
 б – угла установки лопасти  $\alpha$  и диаметра установленных стержневых элементов  $d_0$  при  $n=0,75$  с<sup>-1</sup>; в – частоты вращения лопастных валов  $n$  и диаметра установленных стержневых элементов  $d_0$  при  $\alpha=30^\circ$

На рисунке 2.10, а, показана зависимость мощности, необходимой для преодоления сил лобового сопротивления лопасти со стержневыми элементами, от частоты вращения валов и угла установки лопатки.

При повышении частоты вращения  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$ , мощность на преодоление сил лобового сопротивления повышается. При повышенной частоте вращения возрастает угловая скорость движения лопасти, повышается частота воздействия рабочих органов на материал и, следовательно, повышается сопротивление движению лопасти, поэтому для преодоления этого сопротивления понадобится больше затрат электроэнергии. С увеличением угла установки лопасти повышается проекция её ширины на плоскость, перпендикулярную плоскости

вращения лопасти, следовательно, повышается объем захватываемого материала. Для сдвига и перемещения захватываемого объема материала с увеличением угла  $\alpha$  требуется большее количество энергозатрат.

Так при значениях частоты вращения лопастных валов  $n_1=0,5 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_2=0,75 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_3=1,0 \text{ с}^{-1}$  и фиксированном угле установки лопасти  $\alpha_1=20^\circ$  мощность  $P_{\text{л.с.}}$  принимает соответственно следующие значения:  $P_{\text{л.с.11}}=107 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{л.с.12}}=361 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{л.с.13}}=855 \text{ Вт}$ . Разница между максимальным и минимальным значениями мощности на преодоление сил лобового сопротивления составляет 748 Вт. При увеличении угла до  $\alpha_2=30^\circ$  и аналогичных значениях частоты вращения лопастных валов мощность лобового сопротивления принимает следующие числовые значения:

$P_{\text{л.с.14}}=227 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{л.с.15}}=766 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{л.с.16}}=1816 \text{ Вт}$ . Разница между значениями  $P_{\text{л.с.14}}$  и  $P_{\text{л.с.16}}$  составляет 1589 Вт. При максимальном рассматриваемом угле установки лопасти  $\alpha_3=40^\circ$ , а также идентичных значениях  $n$  мощность, затрачиваемая на преодоление сил лобового сопротивления, составляет:  $P_{\text{л.с.17}}=363 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{л.с.18}}=1225 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{л.с.19}}=2904 \text{ Вт}$ . Разница между максимальным и минимальным значениями мощности на преодоление сил лобового сопротивления составляет 2541 Вт.

Зависимость, изображенная на рисунке 2.10, б, отображает изменение мощности на преодоление сил лобового сопротивления от угла установки лопастей относительно плоскости вращения и диаметра установленных стержневых элементов. Стоит отметить, что с увеличением диаметра установленных стержневых элементов мощность, затрачиваемая на преодоление сил лобового сопротивления, снижается. Это объясняется тем, что коэффициент лобового сопротивления цилиндрического стержня в сыпучей среде меньше, чем аналогичный параметр для плоской пластины. При увеличении диаметра стержневых элементов увеличивается площадь перекрытия рабочей поверхности лопасти продольным сечением стержня. В связи с этим лобовое сопротивление будет меньше.

Так, при варьируемых параметрах угла установки лопасти  $\alpha_1=20^\circ$ ,  $\alpha_2=30^\circ$ ,  $\alpha_3=40^\circ$  и минимальном диаметре стержневых элементов  $d_{01}=0,002 \text{ м}$ , мощность

для преодоления лобового сопротивления принимает соответственно значения  $P_{л.с.21} = 535$  Вт;  $P_{л.с.22} = 979$  Вт;  $P_{л.с.23} = 1461$  Вт. Разница между значениями  $P_{л.с.21}$  и  $P_{л.с.23}$  составляет 926 Вт. При аналогичных диапазонах значения угла  $\alpha$  и повышении диаметра стержневых элементов до  $d_{02} = 0,005$  м, мощность лобового сопротивления соответственно будет равна:  $P_{л.с.24} = 361$  Вт;  $P_{л.с.25} = 766$  Вт;  $P_{л.с.26} = 1225$  Вт. Разница между наибольшим и наименьшим значениями составляет 864 Вт. При максимальных значениях диаметра стержневых элементов  $d_{03} = 0,008$  м и тех же значениях угла  $\alpha$ , мощность, затрачиваемая на преодоление сил лобового сопротивления, примет соответственно значения:  $P_{л.с.27} = 268$  Вт;  $P_{л.с.28} = 630$  Вт;  $P_{л.с.29} = 1062$  Вт. Разница между максимальным и минимальным значениями составляет 794 Вт.

Графическая зависимость мощности, затрачиваемой на преодоление сил лобового сопротивления, от частоты вращения и диаметра установленных стержневых элементов представлена на рисунке 2.10, в.

При значениях частоты вращения лопастных валов  $n_1 = 0,5$  с<sup>-1</sup>;  $n_2 = 0,75$  с<sup>-1</sup>;  $n_3 = 1,0$  с<sup>-1</sup> и фиксированном значении диаметра стержневых элементов  $d_{01} = 0,002$  м, мощность лобового сопротивления соответственно равна:  $P_{л.с.31} = 290$  Вт;  $P_{л.с.32} = 979$  Вт;  $P_{л.с.33} = 2321$  Вт. Разница между минимальным и максимальным значением мощности составляет 2031 Вт. При аналогичных значениях частоты вращения лопастных валов и повышении диаметра установленных стержневых элементов до  $d_{02} = 0,005$  м, мощность лобового сопротивления принимает соответственно следующие значения:  $P_{л.с.34} = 227$  Вт;  $P_{л.с.35} = 766$  Вт;  $P_{л.с.36} = 1816$  Вт. Разница между значениями  $P_{л.с.34}$  и  $P_{л.с.36}$  составляет 1589 Вт. При максимальном значении  $d_{03} = 0,008$  м и принятых значениях  $n$ , мощность на преодоление сил лобового сопротивления соответственно будет равна:  $P_{л.с.37} = 186$  Вт;  $P_{л.с.38} = 630$  Вт;  $P_{л.с.39} = 1493$  Вт. Разница между значениями  $P_{л.с.37}$  и  $P_{л.с.39}$  составляет 1307 Вт.

На рисунке 2.11, а, показана зависимость общей мощности, потребляемой приводом двухвального смесителя с объемом рабочей камеры  $V = 1$  м<sup>3</sup> и радиусом днища корпуса  $R_k = 0,375$  м в зависимости от частоты вращения лопастных валов  $n$

и угла установки лопасти  $\alpha$  относительно плоскости вращения. Мощность высчитывалась с учетом коэффициента энергозатрат  $\lambda=1,1$  и КПД привода  $\eta=0,95$ .

С повышением частоты вращения валов  $n$  и угла установки лопастей  $\alpha$  относительно плоскости вращения общая мощность привода повышается.

Так, при фиксированном значении угла установки лопастей  $\alpha_1=20^\circ$  и диапазоне частоты вращения лопастных валов  $n_1=0,5 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_2=0,75 \text{ с}^{-1}$ ;  $n_3=1,0 \text{ с}^{-1}$  полная мощность привода принимает соответственно следующие значения:  $P_{\text{прив.11}}=1220 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{прив.12}}=4119 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{прив.13}}=9764 \text{ Вт}$ . Разница между наибольшим и наименьшим значениями составляет 8544 Вт.

При увеличении угла установки лопастей до  $\alpha_2=30^\circ$  и аналогичных частотах вращения лопастных валов полная мощность привода принимает соответственно следующие значения:  $P_{\text{прив.21}}=2519 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{прив.22}}=8502 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{прив.23}}=20153 \text{ Вт}$ . Разница между  $P_{\text{прив.21}}$  и  $P_{\text{прив.23}}$  составляет 17634 Вт.

Когда лопасть установлена под максимальным углом  $\alpha_3=40^\circ$ , то при выбранных частотах вращения лопастных валов мощность, затрачиваемая приводом смесителя, соответственно будет равна:  $P_{\text{прив.31}}=4494 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{прив.32}}=15166 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{прив.33}}=35949 \text{ Вт}$ . Разница между наибольшим и наименьшим значениями составляет 31455 Вт.

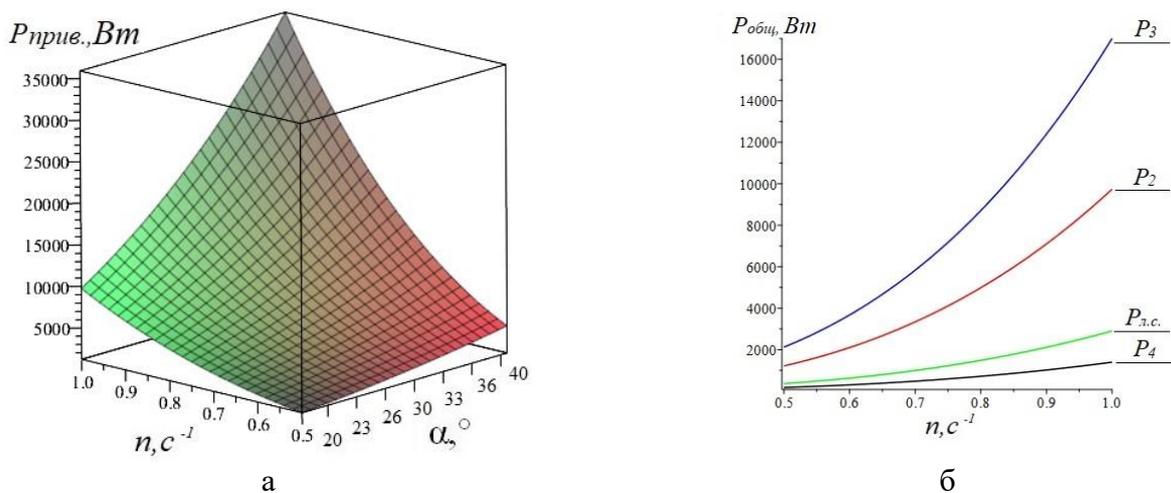


Рисунок 2.11. Графические зависимости:

а – мощности, потребляемой приводом двухвального смесителя с объемом рабочей камеры смесителя  $V=1 \text{ м}^3$  от частоты вращения лопастного вала  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $d_0=0,005 \text{ м}$ ; б – составляющих компонентов мощности, затрачиваемой на процесс смешивания, от частоты вращения лопастного вала  $n$  при  $d_0=0,005 \text{ м}$

На рисунке 2.11, б, показаны зависимости составляющих мощности, затрачиваемой на процесс смешивания, от частоты вращения лопастных валов. При изменении частоты вращения лопастных валов от  $0,5 \text{ с}^{-1}$  до  $1,0 \text{ с}^{-1}$  суммарная мощность  $P_{\text{общ}}$  находится соответственно в диапазоне 3881...31046 Вт.

Мощность  $P_2$ , которая затрачивается на преодоление сил трения о поверхность лопастей, при исследуемых диапазонах частоты вращения лопастных валов находится в диапазоне 1217...9739 Вт. Это составляет 31,35...31,37 % от суммарной мощности.

Мощность  $P_3$ , которая затрачивается на преодоление сил трения о поверхность корпуса, при исследуемых диапазонах частоты вращения лопастных валов составляет 2126...17005 Вт, это 54,77...54,78 % от суммарной мощности.

Мощность  $P_4$ , расходуемая на преодоления сил трения кронштейнов лопасти, при аналогичных значениях частоты вращения лопастных валов составляет 175...1398 Вт. Это около 4,5 % от суммарной мощности

Мощность  $P_{\text{л.с}}$  на преодоление сил лобового сопротивления при вышеперечисленных значениях частот вращения валов находится в диапазоне от 363 Вт до 2904 Вт. В процентном соотношении к суммарной мощности затраты мощности на преодоление сил лобового сопротивления приблизительно составляют 9,35 %.

Таким образом, выражение (2.99) позволяет определить общую затрачиваемую мощность  $P_{\text{общ}}$ , включающую составляющие  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_{\text{л.с}}$ , необходимую для подготовки сухой смеси в двухвальном лопастном смесителе со стержневыми элементами перед рабочими поверхностями лопастей. С использованием разработанного математического выражения (2.95) для рассмотренных вариантов исполнения смесителя со стержневыми элементами при приготовлении цементно-песчаной смеси проведены исследования зависимости мощности  $P_{\text{л.с}}$ , затрачиваемой на преодоление сил лобового сопротивления при вращении лопастного вала, от конструктивных и технологических параметров. Установлено, что при изменении числа оборотов лопастных валов в диапазоне  $n=0,5...1,0 \text{ с}^{-1}$  на долю  $P_{\text{л.с}}$  в общей величине  $P_{\text{общ}}$  приходится около 9,35 %.

## 2.6 Выводы по главе

1. Разработано защищенное патентом Российской Федерации техническое решение в виде стержневых элементов, которые устанавливаются перед лопастями горизонтального лопастного смесителя и обеспечивают повышение качества подготовки сухой смеси.

2. При анализе результатов имитационного моделирования процесса смешивания двухкомпонентной смеси в программной среде EDEM установлено, что наиболее целесообразно использовать два стержневых элемента цилиндрического профиля для достижения наименьших значений времени смешивания  $t$  и коэффициента неоднородности  $V_c$ . Установлено, что в цифровой модели смесителя без стержневых элементов время перехода процесса смешивания в установившееся состояние наступает раньше, чем в цифровой модели смесителя со стержневыми элементами, а коэффициент неоднородности смеси, приготовленной в модели смесителя с установленными перед каждой лопастью двумя цилиндрическими стержневыми элементами, в 2,25 раза меньше, чем в модели без стержней.

3. На основе диффузионной модели разработаны математические выражения, определяющие изменение концентрации ключевого компонента  $C$  и время  $t$ , необходимое для достижения заданной концентрации ключевого компонента в лопастном смесителе со стержневыми элементами.

4. Получено математическое выражение, которое позволяет определить мощность, расходуемую на преодоление сил лобового сопротивления лопасти со стержневыми элементами  $P_{л.с.}$ , являющуюся составляющей общей мощности привода  $P_{прив.}$

5. Полученные математические выражения позволяют определить изменение концентрации ключевого компонента  $C$ , время  $t$ , мощность  $P_{л.с.}$  в зависимости от технологических и конструктивных параметров смесителя: частоты вращения лопастных валов  $n$ , радиуса  $R_{ц}$  и высоты  $h$  установленных стержневых элементов, площади лопасти  $S$  и угла её установки  $\alpha$ .

6. С использованием разработанных математических выражений на примере подготовки цементно-песчаной смеси в двухвальном горизонтальном смесителе периодического действия, со стержневыми элементами, промышленного типа-размера с объемом рабочей камеры  $V=1 \text{ м}^3$  проведены исследования параметров, характеризующих процесс смешивания. Установлены и обоснованы закономерности процесса смешивания компонентов:

- минимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{\min}^c=0,206$  достигается при следующих рациональных значениях конструктивно-технологических параметров лопастного смесителя со 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  $\alpha_{\text{рац.}}=40^\circ$ ;

- наименьшее время смешивания  $t_{\min.}=18 \text{ с}$  для получения заданной концентрации ключевого компонента  $C_k=0,215$  достигается при:  $n_{\text{рац.}}=1,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $R_{\text{ц.рац.}}=0,007 \text{ м}$ ,  $\alpha_{\text{рац.}}=40^\circ$ ,  $r_{\text{рац.}}=0,3 \text{ м}$ .

7. С использованием разработанного математического выражения для рассмотренных вариантов исполнения смесителя со стержневыми элементами при приготовлении цементно-песчаной смеси проведены исследования зависимости мощность  $P_{\text{л.с.}}$ , затрачиваемой на преодоление сил лобового сопротивления при вращении лопастного вала, от конструктивных и технологических параметров. Установлено, что при изменении числа оборотов лопастных валов в диапазоне  $n=0,5 \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$  на долю  $P_{\text{л.с.}}$  в общей величине  $P_{\text{общ}}$  приходится около 9,35 %.

### **ГЛАВА 3. ПЛАН И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Задачи экспериментальных исследований – это исследование влияния технологических и конструктивных параметров предложенной конструкции двухвального смесителя с установленными стержневыми элементами перед лопастями на процесс смешивания, установление областей рациональных значений этих параметров и определение адекватности разработанных математических выражений. Установленные стержневые элементы воздействуют на образующееся перед рабочей поверхностью лопасти уплотнение из смешиваемых компонентов, деформируя его, заставляя частицы материала двигаться в различных направлениях и с разными скоростями. При этом повышается однородность сухой строительной смеси и качество готового продукта. При проведении исследований на экспериментальной установке смесителя в качестве компонентов приняты фракционированный мелкозернистый кварцевый песок и цемент для приготовления сухой строительной смеси (ССС).

#### **3.1 Основные положения экспериментальных исследований**

Задача подготовительных работ к проведению экспериментальных исследований сводится к тому, чтобы определить главные варьируемые факторы, существенно влияющие на показатели качества приготовленной смеси, такие как коэффициент неоднородности смеси, прочностные характеристики приготовленного из нее бетона, время смешивания, а также потребляемая мощность двухвального смесителя со стержневыми элементами.

Для решения поставленных задач разработаны следующие этапы проведения эксперимента.

1. Разработка экспериментальной установки двухвального смесителя:
  - разработка конструкторской документации для изготовления двухвального смесителя со стержневыми элементами цилиндрического профиля;

- изготовление экспериментальной модели смесителя, бункера с крышкой и шиберным затвором, пробоотборника и кондуктора для отбора проб;

- пуско-наладочные работы и настройка установки.

## 2. Подготовка к проведению эксперимента:

- выбор функций отклика, по которым будет оцениваться эффективность новой конструкции двухвального смесителя;

- определение конструктивных и технологических параметров, которые оказывают наибольшее влияние на повышение эффективности процесса смешивания в предложенной конструкции смесителя;

- выбор устройств и приспособлений, методики, а также средств контроля для отбора и исследования проб смешиваемого материала;

- подготовка сырьевых материалов для проведения эксперимента и получения заданной марки цементно-песчаной смеси;

- выбор уровней и интервалов варьирования основных конструктивно-технологических параметров двухвального смесителя со стержневыми элементами;

- разработка и применение плана, по которому будет проводиться многофакторный эксперимент.

## 3. Проведение эксперимента:

- осуществление экспериментальных исследований в соответствии с разработанным планом по выбранным исследуемым параметрам и интервалам их варьирования;

- отбор проб с помощью пробоотборника и кондуктора для отбора проб в соответствии с принятой методикой;

- определение коэффициента неоднородности смеси методом ситового анализа;

- определение потребляемой мощности приводом смесителя с помощью программного обеспечения для управления частотным преобразователем;

- определение водоцементного соотношения для приготовления из полученной смеси бетона для формования образцов;

- формование из бетонной смеси балочек в форме ЗФБ-40 размером 160x40x40 мм и выдерживание в камере нормального твердения в течение 28 суток;

- проведение испытаний по определению предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$  полученных бетонных образцов;

- контроль и регистрация результатов проведения экспериментальных исследований в сводных таблицах.

4. Обработка полученных результатов и анализ влияния конструктивно-технологических параметров лопастного двухвального смесителя со стержневыми элементами на повышение однородности сухой смеси и качество готового продукта по результатам проведенных экспериментальных исследований.

### **3.2 Описание экспериментальной установки, методов и средств контроля измерений**

Анализ существующих конструкций смесителей с горизонтальным расположением валов, в том числе одновальных и двухвальных лопастных смесителей, позволил разработать экспериментальную установку смесителя, перед рабочей поверхностью каждой лопасти которого были установлены стержневые элементы цилиндрического профиля. При разработке и проектировании данной установки учитывался тот факт, что смеситель будет использоваться исключительно для проведения экспериментальных исследований. Фотография экспериментальной установки двухвального смесителя показана на рисунке 3.1.

Экспериментальная модель смесителя состоит из следующих основных элементов: привода, корпуса смесителя, двух лопастных валов, лопастей с установленными перед их рабочими поверхностями стержневыми элементами, рамы, прямоугольной крышки с установленным на ней бункером с шиберной заслонкой.



Рисунок 3.1. Экспериментальная установка двухвального смесителя с установленными стержневыми элементами

Привод двухвального смесителя состоит из электродвигателя (АИР180S2,  $P_{nom}=2,2$  кВт) 1, который при помощи муфты 2 передает вращение на быстроходный вал редуктора 3 с передаточным числом  $u=48$  (рисунок 3.2). При помощи муфты 4 вращение от тихоходного вала редуктора передается на шестерни-синхронизаторы 7, которые установлены на лопастные валы 8. Каждый вал опирается на две подшипниковые опоры 6 типа УСПА-207 с подшипниками качения. Для обеспечения соосности валов электродвигателя, редуктора и смесителя применяются металлические прокладки различной толщины.

Корпус смесителя 17 выполнен сварным из листовой стали толщиной  $4 \cdot 10^{-3}$  м. Нижняя часть корпуса свальцована с внутренним радиусом  $79 \cdot 10^{-3}$  м. Общая высота камеры смешивания составляет 0,173 м, ширина – 0,288 м, длина – 0,5 м. Полный геометрический объем рабочей камеры смесителя  $V=2,2 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>. Корпус смесителя 17 и привод установлены на сварную раму 18. Верхняя часть корпуса 17 выполнена в виде фланцев с продолговатыми отверстиями. На эту часть устанавливается бункер 5 для загрузки исходных компонентов смеси и при помощи болтового соединения крепится к корпусу смесителя. Для подачи материала бункер снабжен шиберной заслонкой 16.

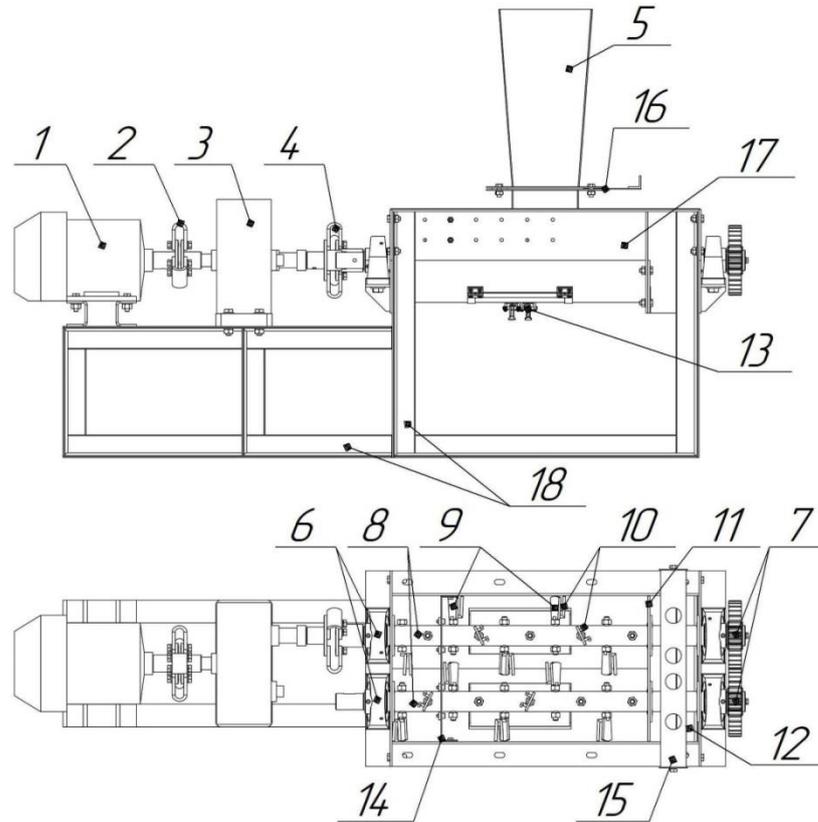


Рисунок 3.2. Устройство двухвального лопастного смесителя с установленными стержневыми элементами:

- 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – муфта; 5 – бункер для загрузки материала;  
 6 – подшипники; 7 – шестерни; 8 – валы; 9 – лопасти; 10 – стержневые элементы;  
 11 – перегородка; 12 – отверстие для выгрузки материала; 13 – выгрузные люки;  
 14 – перегородка; 15 – кондуктор для отбора проб; 16 – шибер; 17 – корпус; 18 – рама

По конструктивному решению экспериментальная установка двухвального смесителя может работать как в периодическом, так и в непрерывном режимах смешивания. Для этого предназначена съемная перегородка 11, которая при непрерывном режиме работы не устанавливается в корпусе смесителя, а при периодическом режиме работы закрепляется к боковым стенкам корпуса при помощи винтового соединения (рисунок 3.3).

Перегорodka 14 служит для изменения объема рабочей камеры смесителя при периодическом режиме работы и регулировании длины камеры при непрерывном режиме смешивания. Она состоит из трех частей – одной верхней части и двух нижних частей. Соединяются детали между собой при помощи винтов. Верхняя часть перегородки имеет специальные проушины, при помощи которых

она крепится болтами к отверстиям, выполненным по бокам корпуса 17. В ходе проведения эксперимента данная перегородка не использовалась.



Рисунок 3.3. Съёмная перегородка для обеспечения работы смесителя в периодическом режиме

Части лопастных валов 8, расположенные в рабочей камере смесителя, имеют сквозные резьбовые отверстия М10, с шагом 50 мм, для установки перемешивающих органов – лопастей 9. Лопасти 9 установлены в радиальные резьбовые отверстия валов 8 таким образом, чтобы обеспечивалось круговое движение смешиваемых компонентов в рабочей камере двухвального смесителя. Это достигается за счет установки лопастей на одном валу под углом, обеспечивающим движение смеси в одну сторону, а на втором валу – угол установки лопастей обеспечивает движение компонентов в обратную сторону. Таким образом, происходит равномерное распределение компонентов по всему объему рабочей камеры смесителя.

В каждой лопасти 9 предусмотрены отверстия диаметром 6 мм, которые предназначены для установки предложенных стержневых элементов 10 цилиндрического профиля, которые позволяют интенсифицировать процесс смешивания (рисунок 3.4).

Стержневые элементы 10 представляют собой сварную конструкцию из двух резьбовых штанг М5, сваренных между собой под прямым углом. Для крепления стержневых элементов к лопасти, а также регулирования расстояния между

её рабочей поверхностью и стержневыми элементами цилиндрического профиля, используются гайки М5, которые устанавливаются с двух сторон лопатки.



а

б

Рисунок 3.4. Рабочие органы смесителя:

а – элементы рабочих органов двухвального смесителя;  
б – лопасть с установленными стержневыми элементами

Угол установки лопасти относительно плоскости вращения выверяется с помощью специально предусмотренного для этого кондуктора (рисунок 3.5).

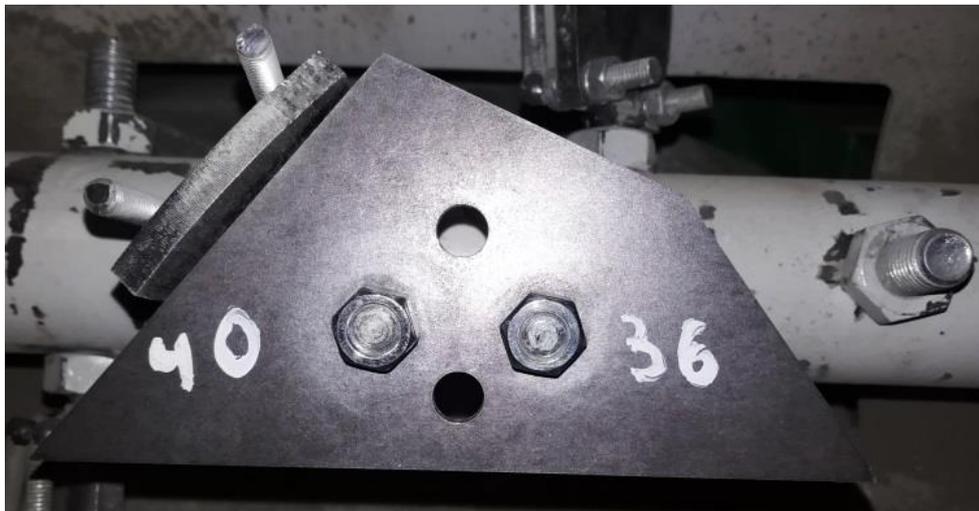
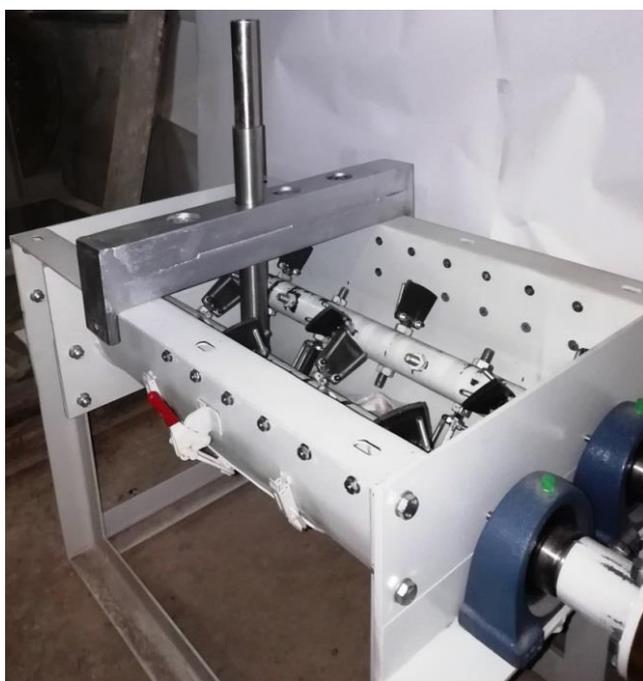


Рисунок 3.5. Кондуктор для регулирования угла установки лопасти

Важным звеном при проведении эксперимента является отбор проб. Специально для этого применяются пробоотборник для точечного отбора проб и кондуктор (рисунок 3.6), обеспечивающий ввод пробоотборника без отклонений от

перпендикулярности относительно горизонтальных осей валов смесителя. Данная конструкция позволяет осуществлять точный отбор проб из заранее предусмотренных для этого зон смесителя.

Кондуктор для отбора проб представляет собой сварную конструкцию из двух швеллеров, в основании которых соосно и попарно выполнены отверстия в соответствии со схемой отбора проб в двухвальной смесителе. С торцевой стороны к швеллерам приварены две пластинки с резьбовыми отверстиями, которые служат для закрепления кондуктора на корпусе смесителя при помощи прижимных винтов. Так как отверстия в кондукторе выполнены попарно, исключается возможность перекоса пробоотборника относительно вертикальной его оси.



а



б

Рисунок 3.6. Устройства для отбора проб:  
а – общий вид пробоотборника и кондуктора для отбора проб; б – отбор проб

Пробоотборник (рисунок 3.7) типа «труба в трубе» состоит из двух соосно расположенных труб. Внешний корпус 1 представляет собой трубу с вырезом в нижней части и конусом 3, расположенным на нижнем конце трубы. Конус 3 необходим для проникновения в приготовленную смесь без нарушения ее структуры. Внутренняя часть пробоотборника 2 представляет собой трубу с аналогичным вырезом, как во внешней трубе, только нижний конец трубы заглушен плоским

круглым листом – доньшком 4. Эта часть, называемая пробозаборником, служит для отбора пробы и её изъятия из смеси.

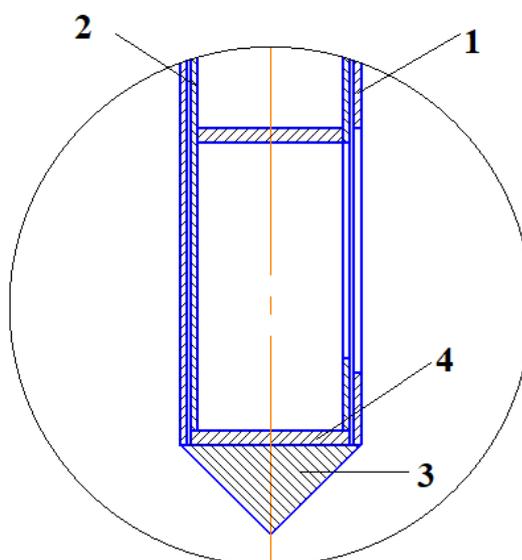


Рисунок 3.7. Схема пробозаборника:

1 – внешняя труба (корпус); 2 – внутренняя труба (пробозаборник); 3 – конус; 4 – доньшко

Стенд управления использовался для запуска, управления и завершения работы экспериментальной установки двухвального смесителя.

При проведении эксперимента регулировалась частота электрического тока в пределах от 0 до 65 Гц для электродвигателя АИР180S2, что обеспечивало изменение требуемой частоты вращения лопастных валов в пределах  $0,66...1,34 \text{ с}^{-1}$ . Это осуществлялось с помощью частотного регулятора Delta, номинальной мощности 3,7 кВт, с номинальным током для нормальной нагрузки 8,2 А. Передача информации передавалась на ПК с помощью кабеля USB.

Перед проведением эксперимента используемые сырьевые материалы были просушены в сушильном шкафу КВС-G 100/250 при температуре 115 °С. Согласно технической характеристики сушильного шкафа рабочая температура сушки составляет  $t=+40 \div +250 \text{ °С}$ , объем сушильной камеры  $0,1 \text{ м}^3$ , мощность шкафа составляет 1500 Вт. Влажность исходных компонентов определялась по разнице массы до просушки и после.

Масса загружаемых компонентов определялась при помощи электронных весов CAS SW-10 с точностью взвешивания  $5 \times 10^{-3}$  кг и максимальным пределом взвешивания 10 кг.

Для отсева материала и проб использовались лабораторные сита по ГОСТ Р 51568-99.

Масса каждой пробы определялась с помощью электронных весов лабораторных весов типа ЛВ 210-А первого специального класса точности измерений. Наименьший предел взвешивания  $10 \times 10^{-6}$  кг, наибольший предел взвешивания – 0,21 кг.

Для определения консистенции цементного раствора использовался встряхивающий столик ЛВС с диаметром рабочего столика 300 мм, высотой подъема подвижно части  $10 \pm 0,5$  мм, высотой 260 мм и массой 9,5 кг.

Для распределения раствора по рабочей поверхности столика использовалась форма-конус с центрирующим устройством.

Для обеспечения точной дозировки воды использовались Цилиндр 1-250-1 в соответствии с ГОСТ 1770-74.

Время проведения опытов определялось при помощи секундомера С-11-16 ГОСТ 8.423-81 II класса с точностью  $\pm 0,1$  с.

Для проведения испытания на прочность сжатия использованы следующие устройства:

- разъемные стальные формы с поддоном по ГОСТ 22685;
- пресс гидравлический ПГМ-100 МГ4;
- штангенциркуль ШЦ-Н—250—0,05 ГОСТ 166—89;
- стержень стальной диаметром 12 мм, длиной 300 мм;
- шпатель для уплотнения раствора в формах;
- вибрационная площадка СМЖ-539 МЭ с частотой вертикальных колебаний  $2900 \pm 100$  колебаний в минуту, амплитудой от 0,15 до 1,0 мм. Габаритные размеры вибрационной площадки (Д×Ш×В) – 580×410×500 мм, масса – 105 кг;
- камера нормального твердения КНТ-1, характеристики которой приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики камеры нормального твердения

Максимальное количество одновременно испытываемых образцов, шт.	42
Температура воды (пара), °С	20-100
Точность регулирования температуры, °С	не более 2
Время участка регулирования температуры при температуре 20±2° С	без ограничений
Время участка регулирования при подборе режимов тепловой обработки с подъемом температуры, час	до 99час. 59 мин.
Шаг задания времени, мин.	1

Температура окружающего воздуха измерялась при помощи стеклянного жидкостного технического термометра по ГОСТ 28498-90, с предельным значением диапазона измерений 50°С.

Относительная влажность воздуха измерялась психрометром МВ-4М по ГОСТ 17.2.4.08 с диапазоном измерения влажности от 10 до 100% при температуре воздуха от – 10 до + 40 °С.

Испытания полученных образцов на сжатие проводились на гидравлическом прессе ПГМ-100 МГ4 с наибольшим пределом нагрузки 100 кН. Техническая характеристика пресса приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Техническая характеристика гидравлического пресса ПГМ-100 МГ4

Параметр	Единица измерений	Значение
Пределы нагрузок:		
- наименьший	кН	1
- наибольший	кН	100
Высота рабочего пространства	Мм	160
Глубина рабочего пространства	Мм	140
Ширина рабочего пространства	Мм	140
Ход поршня рабочего цилиндра (не менее)	Мм	10
Габаритные размеры Д×Ш×В	Мм	315×480×780
Погрешность измерения нагрузки	%	от 1 до 5% НПИ - ±3%; свыше 5 до 100% НПИ - ±1%

Алгоритм проведения эксперимента следующий:

1. Подготовка двухвального смесителя со стержневыми элементами к эксперименту: настройка угла установки лопастей, установка стержневых элементов на заданном расстоянии от рабочих поверхностей лопастей, проверка свободного вращения валов и обеспечение чистоты рабочей камеры смесителя.

2. Установка бункера и закрепление его к корпусу смесителя при помощи болтового соединения. Проверка закрытия шиберной заслонки.

3. Загрузка исходных компонентов – песка и цемента в соотношении согласно рецептуре. Первым в бункер загружается цемент, вторым – песок.

4. Проверка готовности стенда управления экспериментальной установкой и программного обеспечения для считывания и демонстрации результатов эксперимента. Открытие шиберной заслонки и загрузка исходных компонентов. После завершения загрузки шибер должен быть закрыт.

5. Запуск экспериментальной установки. Проведение эксперимента в течение заранее определенного времени при выходе вращения лопастных валов на номинальную частоту вращения.

6. Остановка двухвального лопастного смесителя. Снятие бункера с корпуса смесителя.

7. Отбор проб из смешиваемого материала по выбранной методике. Подготовка объединенной пробы.

8. Сокращение объединенной пробы методом квартования для определения коэффициента неоднородности полученной смеси, оставшаяся часть пробы использована для определения прочностных характеристик сухой строительной смеси, полученной в экспериментальной установке. Взвешивание полученных проб.

9. Разгрузка смесителя, очистка рабочей камеры.

### **3.3 Физико-механические характеристики материалов**

В производстве сухих строительных смесей существует большое количество рецептов. В настоящее время производители сухих строительных

смесей широко применяют помимо основных компонентов – вяжущего и наполнителя, различные добавки, которые придают готовой смеси необходимые потребителю свойства.

При проведении экспериментов приготавливалась цементно-песчаная смесь согласно СП 80-101-98 с соотношением песка к цементу 4:1.

Цемент марки ПЦ500-Д0 по ГОСТ 10178-85 ЗАО «Белгородский цемент» с остатком 8,3 % на контрольном сите №008 использовался в качестве вяжущего (рисунок 3.8, а). В качестве наполнителя использовался кварцевый песок по ГОСТ 8736-2014, крупностью от 0,3 до 0,8 мм (рисунок 3.8, б).

Для точного определения коэффициента неоднородности весь объем кварцевого песка, необходимого для проведения экспериментальных исследований, был просеян на сите 0,315 мм ГОСТ Р 51568-99. Это позволило исключить просеивание пылевидной фракции песка вместе с цементом, что повысило достоверность определения коэффициента неоднородности.



а



б

Рисунок 3.8. Сырьевые материалы для получения смеси:  
а – цемент; б – кварцевый песок

При выбранном исходном соотношении компонентов песчано-цементной смеси она будет иметь ориентировочную плотность  $1400 \text{ кг/м}^3$ ; угол естественного откоса сухой смеси –  $42^\circ$ ; предел прочности бетона, приготовленного из полученной сухой строительной смеси в 28-ми суточном возрасте твердения – не менее 15 МПа.

### 3.4 Методики экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований выбраны методики определения качественных показателей сухой строительной смеси, которая была получена в результате эксперимента в двухвальном смесителе со стержневыми элементами.

Оценка смесеприготовления в предложенной конструкции смесителя осуществлялась по следующим показателям:

- коэффициент неоднородности,  $V_c$ , %;
- предел прочности на сжатие бетонных образцов, приготовленных из полученных смесей,  $\sigma_{сж}$ , МПа;
- мощность, потребляемая приводом смесителя,  $P_{прив.}$ , Вт.

Отбор проб из приготовленной смеси осуществлялся согласно ГОСТ Р 58277–2018. Масса отобранного смешанного материала обеспечивала получение объединённой пробы, достаточной для проведения не менее двух определений контролируемых показателей качества смеси. Исходя из этого, изготавливались по две бетонные балочки размером 160×40×40 мм в форме ЗФБ-40 на каждый опыт и для каждой из четырех их половинок проводились испытания на прочность сжатия. С учетом объема формы для балочек и потерь в массе при затворении сухой строительной смеси водой для определения прочностных характеристик образцов отбиралось по 1,3 кг получаемой смеси. Для определения коэффициента неоднородности смеси в каждом опыте использовалось 0,15 кг смеси, которая разделялась на три пробы по 0,05 кг каждая.

Для получения адекватных значений контролируемых показателей качества смеси подготавливалась объединенная проба. Эта проба состояла из 36 отобранных точечных проб по всему объему смесителя. Схема отбора проб в рабочей камере смесителя представлена на рисунке 3.9.

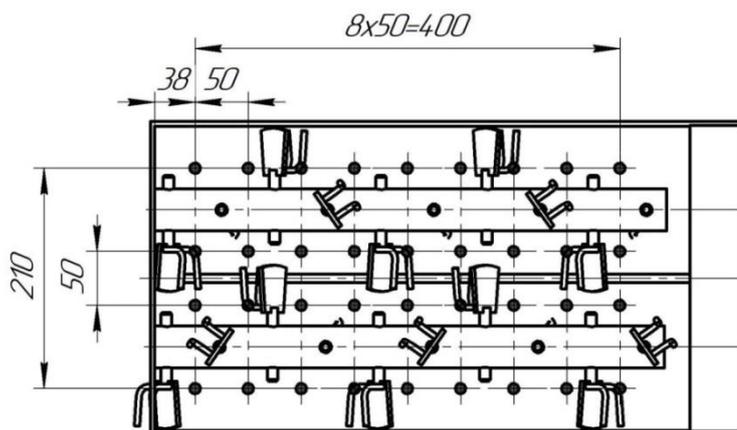


Рисунок 3.9. Схема отбора проб в смесителе со стержневыми элементами

Для изъятия проб использовался точечный пробоотборник. Чтобы отбирать пробу из определенного места рабочей камеры смесителя, был изготовлен кондуктор для отбора проб. С его помощью пробы отбирались из тех мест, которые показаны на схеме. Для предотвращения смещений кондуктора отбора проб и пробоотборника кондуктор закреплялся к боковым стенкам корпуса смесителя при помощи винтов, а выполненные концентрично расположенные отверстия в кондукторе позволяли точечному пробоотборнику входить в смесь строго под углом  $90^\circ$  относительно днища корпуса.

Отобранные 36 точечные пробы объединялись в одну пробу. Для определения коэффициента неоднородности смеси объединенная проба сокращалась до массы 0,15 кг методом квартования. Оставшаяся масса пробы 1,3 кг была использована для получения бетонных балочек.

Для двухкомпонентной смеси использован метод ситового анализа концентрации ключевого компонента, позволяющий по формуле (1.1) рассчитать коэффициент неоднородности приготовленной смеси. Во-первых, этот метод прост, достаточно точен и не требует дорогостоящего оборудования. Во-вторых, готовая смесь является двухкомпонентной. Один из компонентов, портландцемент, является тонкодисперсным, с размерами частиц менее 0,1 мм, а размеры частичек песка находятся в интервале (+ 0,315; - 0,8 мм), что позволяет методом рассеивания на сите с размером ячейки 200 мкм, выполненного в соответствии с ГОСТ Р

51568-99 (ИСО 3310-1-90), определить массу каждого компонента смеси. В-третьих, разделение двухкомпонентной смеси не будет трудоемким в плане объема работ.

По рекомендациям [79] в качестве ключевого компонента выбирается компонент с минимальной концентрацией в смеси. В нашем случае это портландцемент с содержанием 20% от общей массы смеси. Количество проб, а также их отбор и масса каждой пробы выбирались согласно рекомендациям. Каждая проба была взвешена с помощью электронных весов. Для просева каждой пробы использовался белый лист бумаги. Рассев проходил до тех пор, пока на бумагу не прекращалось выпадение частиц цемента. После ситового анализа, на электронных весах определялась масса ключевого компонента, после чего находилось процентное содержание портландцемента в готовой смеси. Методика эксперимента была неизменной для каждой пробы.

Перед изготовлением образцов-балочек  $160 \times 40 \times 40$  мм определялось необходимое водоцементное соотношение.

Для затворения смеси отобрана проба общей массой 1,3 кг.

Была использована методика определения водоцементного соотношения в соответствии с ГОСТ 310.4-81.

В результате определено оптимальное количество воды для затворения песчано-цементной смеси массой 1,3 кг. При 0,185 л. расплыв конуса согласно ГОСТ 310.4-81 был в пределах нормы и составлял 107 мм в диаметре.

Для затворения смеси использовалась вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Прочностные характеристики изделий из полученной смеси – основной качественный параметр для оценки эффективности процесса смешивания кварцевого песка и цемента в предложенной новой конструкции двухвального смесителя. В рассматриваемой работе определялся предел прочности бетонных образцов на сжатие,  $\sigma_{сж}$ , в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018.

Сущность метода заключается в разрушении под воздействием гидравлического пресса бетонного образца, изготовленного из затворенной водой сухой

строительной смеси. Возраст твердения образцов – 28 суток. Образцы хранились в камере нормального твердения КНТ-1. Размеры образцов также регулируются соответствующими стандартами.

Для изготовления образцов-балочек были использованы формы ЗФБ-40 (рисунок 3.10).

Для уплотнения раствора в формах использовалась лабораторная вибрационная площадка СМЖ-539 МЭ.

Предел прочности на сжатие (МПа, кгс/см) определялся по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P_p}{S_{п}}, \quad (3.1)$$

где  $P_p$  – нагрузка, вызывающая разрушение образца, Н, кгс;

$S_{п}$  – площадь, на которую действует нагрузка (равна площади пластины, 25 см<sup>2</sup>).



а



б

Рисунок 3.10. Устройства и образцы для исследования прочностных характеристик бетона:  
а – форма для изготовления балочек ЗФБ-40; б – балочки-образцы 160×40×40 мм

Перед проведением основных экспериментальных исследований выполнялся поисковый эксперимент по определению необходимого времени смешивания для получения качественной смеси.

Для этого проведен ряд опытов с различным временем смешивания от 30 с до 180 с при различных значениях исследуемых факторов. После каждого проведенного опыта определялся коэффициент неоднородности.

Процесс смешивания переходил в установившееся состояние при самых неблагоприятных сочетаниях исследуемых факторов не позднее  $t=90$  с после его

начала. Поэтому было принято решение об использовании  $t=90$  с. в качестве времени смешивания для всех последующих опытов.

Потребляемая приводом смесителя мощность определялась при помощи программного обеспечения *VFDsoft*, которое специально предназначено для работы с частотным преобразователем *Delta*. На рисунке 3.11 показано рабочее окно программы в момент проведения эксперимента.

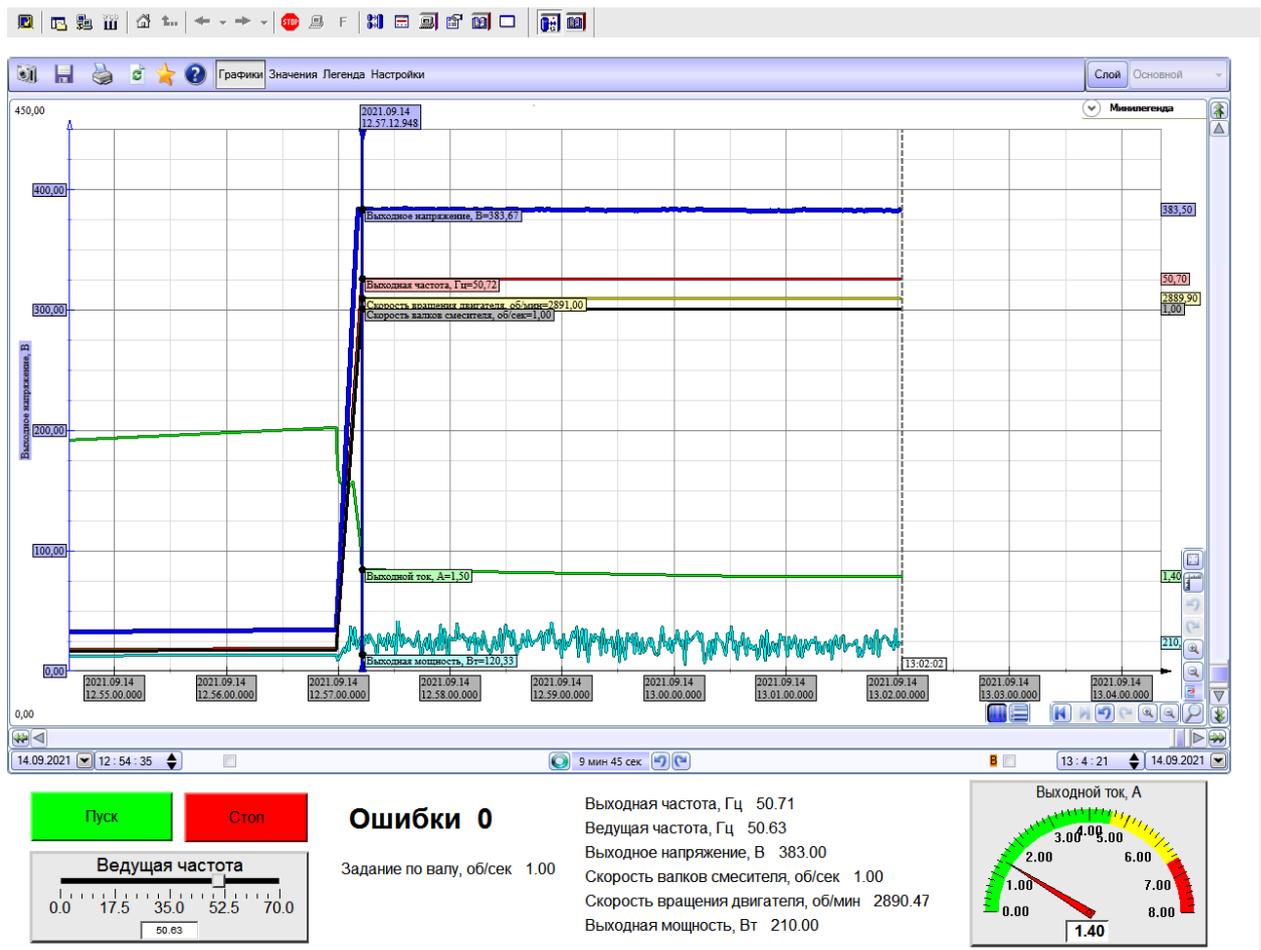


Рисунок 3.11. Рабочее окно программы *VFD soft*

Программа позволила фиксировать изменение показаний мощности, потребляемой приводом смесителя, три раза за одну секунду. Отчет времени смешивания начинался с выхода частоты вращения валов смесителя на номинальное количество оборотов. После этого в рабочем окне программы создавалась метка, от которой отсчитывалось время смешивания, достаточное для получения качественной смеси.

Програмное обеспечение *VFDsoft* позволяет вывести результаты в виде графиков (рисунок 3.12), а численные результаты сохранять в виде таблицы *MS Excel*.

Как видно из рисунка 3.12, график регистрации мощности, потребляемой приводом смесителя, имеет ломанную структуру с минимальными и максимальными пиковыми значениями. Это объясняется тем, что в процессе смешивания наблюдается поочередный вход и выход из смеси от двух до трех пар лопастей смесителя, в связи с чем наблюдается либо рост, либо уменьшение значений потребляемой мощности.

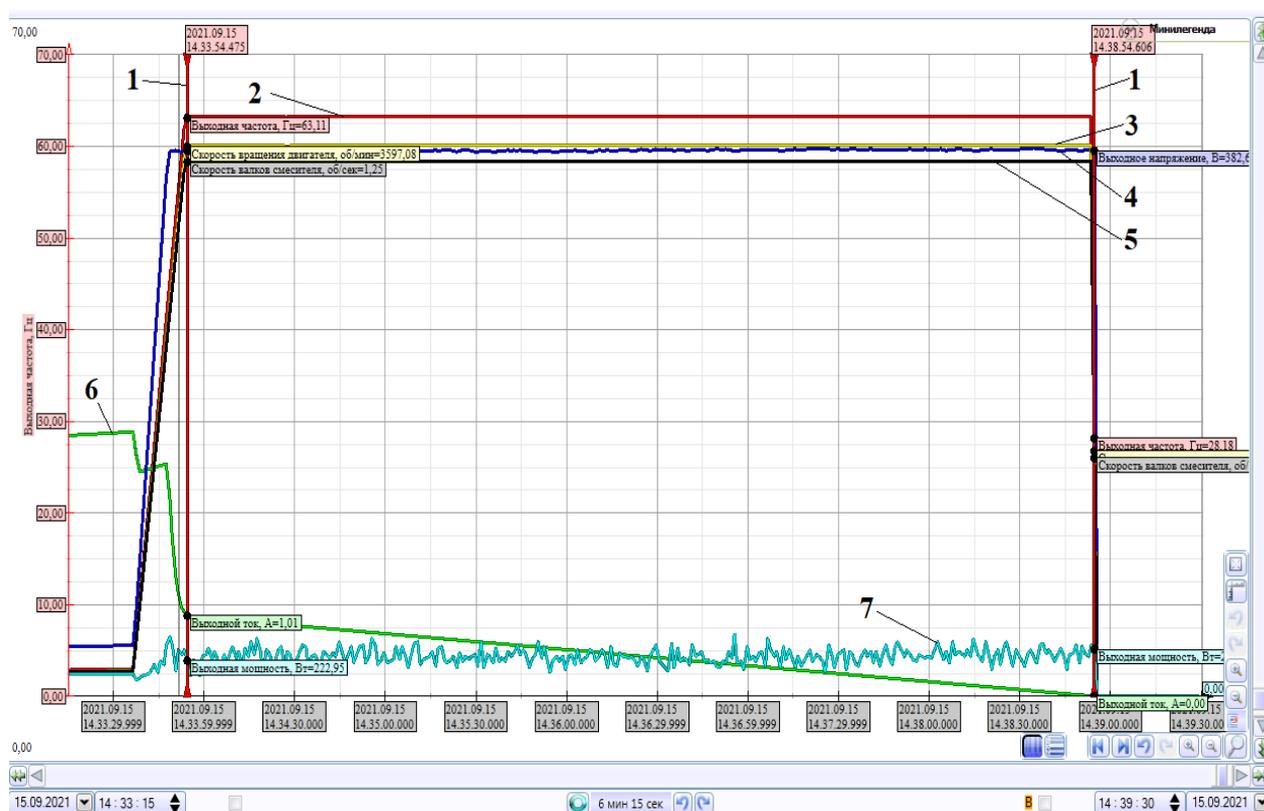


Рисунок 3.12. Результаты экспериментов по определению мощности привода смесителя в виде графиков:

- 1 – метки начала и окончания регистрации измерений; 2 – выходная частота тока;
- 3 – частота вращения вала электродвигателя; 4 – выходное напряжение;
- 5 – частота вращения валов смесителя; 6 – сила тока;
- 7 – график регистрации мощности, потребляемой приводом смесителя.

Точное значение потребляемой мощности высчитывалось как среднее арифметическое из полученных измерений в табличном виде.

### 3.5 План и программа экспериментальных исследований

Для определения рациональных технологических и конструктивных параметров двухвального смесителя со стержневыми элементами проведен ряд экспериментальных исследований [47, 98].

Подготовка смесей осуществлялась в периодическом режиме работы смесителя по ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup>. Применение рототабельного плана эксперимента, по сравнению с ортогональным, позволяет получить более точное математическое описание поверхности отклика, что достигается благодаря увеличению числа опытов в центре плана и специальному выбору величины звездного плеча.

Математическая модель, полученная в результате обработки, представляет собой ряд Тейлора, описываемый следующим уравнением регрессии:

$$y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + \dots + a_{(n-1)n} \cdot X_{n-1} \cdot X_n + a_{11} \cdot X_1^2 + \dots + a_{nn} \cdot X_n^2, \quad (3.2)$$

где  $y$  – функция отклика;

$a_0$  – нулевое значение коэффициента уравнения регрессии;

$a_1, a_2 \dots a_n$  – коэффициенты при линейной зависимости;

$a_{12}, a_{23} \dots a_{(n-1),n}$  – коэффициенты при парном взаимодействии факторов;

$X_1, X_2 \dots X_n$  – факторы варьирования.

Каждое из полученных уравнений регрессии проверялось на адекватность с помощью критерия Фишера ( $F$ -критерий), расчетное значение которого сравнивалось с табличным согласно общепринятым методикам [2, 83, 98].

Каждый коэффициент уравнений регрессии проверялся на значимость по критерию Стьюдента согласно формуле:

$$t_{ст.} = \frac{|a_n|}{S_{\{a_n\}}}, \quad (3.3)$$

где  $a_n$  – коэффициент, расположенный при факторах варьирования;

$S_{\{a_n\}}$  – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup>, согласно которой проводились экспериментальные исследования в двухвальном ло-

падном смесителе со стержневыми элементами цилиндрического профиля, представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица планирования эксперимента ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup>

Номер опыта	План			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
1	-1	-1	-1	Опыты факторного планирования
2	+1	-1	-1	
3	-1	+1	-1	
4	-1	-1	+1	
5	+1	+1	-1	
6	-1	+1	+1	
7	+1	-1	+1	
8	+1	+1	+1	
9	+1,680	0	0	Опыты в звездных точках
10	-1,680	0	0	
11	0	+1,680	0	
12	0	-1,680	0	
13	0	0	+1,680	
14	0	0	-1,680	
15	0	0	0	Опыты в центре плана
16	0	0	0	
17	0	0	0	
18	0	0	0	
19	0	0	0	
20	0	0	0	

Чтобы исключить систематические ошибки во время проведения экспериментов, опыты проводились согласно матрице в случайном порядке.

### 3.6 Определение количества повторных опытов

Чтобы получить адекватные уравнения регрессии и достоверные результаты экспериментальных исследований, необходимо было рассчитать количество проведения повторных опытов.

По результатам поискового эксперимента определялась мощность, потребляемая приводом смесителя  $P_{\text{прив}}$ , Вт. Результаты проведения десяти опытов при одинаковых условиях продемонстрированы в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты поисковых экспериментов для потребляемой приводом смесителя мощности  $P_{\text{прив}}$

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\Sigma\Delta$
$N_i$ , Вт	249	250	249	251	250	250	251	251	252	252	252	252	$N_i$ =250,64
$\Delta N_i$ , Вт	-1,64	-0,64	-1,64	0,36	-0,64	-0,64	0,36	0,36	1,36	1,36	1,36	1,36	-0,04
$\Delta N_i^2$ , Вт	2,69	0,41	2,69	0,13	0,41	0,41	0,13	0,13	1,85	1,85	1,85	1,85	14,4

Оценка дисперсии воспроизводимости находится по формуле:

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} (N_i - \bar{N}_i)^2}{n_0 - 1}} = 1,2, \quad (3.4)$$

где  $n_0$  – начальное количество повторных опытов;

$N_i$  – значение потребляемой мощности для  $i$ -того опыта;

$\bar{N}_i$  – среднеарифметическое значение потребляемой мощности для  $n_0$  опытов.

Максимальное отклонение экспериментальных данных от среднего значения потребляемой приводом смесителя мощности рассчитывалось по формуле:

$$U_{max} = \frac{(N_{max} - \bar{N}_i)}{s} = \frac{252 - 250,64}{1,12} = 1,13, \quad (3.5)$$

где  $N_{max}$  – максимальное значение потребляемой мощности из  $n_0$  опытов.

Первый центральный момент и коэффициент вариации выражены в процентном отношении для экспериментов и рассчитаны по следующим зависимостям соответственно:

$$p_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (N_i - \bar{N}_i)^2}{n_0} \cdot 100\% = \frac{0,04}{11} \cdot 100\% = 0,364\% ; \quad (3.6)$$

$$\Omega_V = \frac{S_D}{\bar{N}_i} \cdot 100\% = \frac{1,12}{250,64} \cdot 100\% = 0,447\% . \quad (3.7)$$

Количество повторных опытов вычислялось по формуле:

$$n_{\text{п}} = \frac{U_{max}^2 \cdot \Omega_V^2}{p_1^2} = \frac{1,21^2 \cdot 0,447^2}{0,364^2} = 2,23 . \quad (3.8)$$

Расчет количества повторных опытов, необходимых для получения точных экспериментальных значений коэффициента неоднородности получаемой сухой строительной смеси  $V_c$ , %, а также предела прочности на сжатие бетонных образцов, изготавливаемых из этой смеси  $\sigma_{сж}$ , МПа, показал, что их расчетное количество

ство не превышает трех. В связи с этим было принято решение о проведении трех повторных опытов для каждой из исследуемой функции.

Оценка воспроизводимости опытов осуществлялась по известным методикам [2, 83, 98]. Для трех параллельных опытов проведенных при одинаковых условиях соблюдалось условие:

$$G_p \leq G, \quad (3.9)$$

где  $G_p$  – расчетное значение критерия Кохрена;

$G$  – значение критерия Кохрена, определенное по таблице в работе для доверительной вероятности  $P=0,95$ .

### 3.7 Выводы по главе

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка двухвального горизонтального лопастного смесителя со стержневыми элементами цилиндрического профиля. Для получения и регистрации достоверных данных при проведении эксперимента определен перечень необходимых измерительного и контрольного оборудования, приведены его характеристики.

2. Представлены рецептура сухой строительной смеси и характеристики, используемых компонентов: цемента, кварцевого песка и воды.

3. Разработана программа экспериментальных исследований, осуществлен выбор методик их проведения.

4. Выбран центральный композиционный ротатабельный план полного факторного эксперимента (ПФЭ ЦКРП  $2^3$ ). Определены функции отклика и варьируемые факторы, а также уровни их варьирования. Установлено количество повторных опытов для проведения экспериментов.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполнения поставленных задач проведены экспериментальные исследования согласно разработанному плану, которые позволили определить коэффициент неоднородности сухой строительной цементно-песчаной смеси, предел прочности на сжатие бетонных изделий, изготовленных из полученной смеси, а также мощность, затрачиваемую приводом на процесс смесеобразования в двухвальном смесителе со стержневыми элементами. Задача экспериментальных исследований заключалась в том, чтобы подтвердить достоверность математического описания процесса смешивания, а также повышение качества смесеприготовления.

### 4.1 Обоснование выбора варьированных факторов

К основным показателям, характеризующим работу горизонтального лопастного смесителя, следует отнести производительность  $Q$ , коэффициент неоднородности  $V_c$ , потребляемую приводом смесителя мощность  $P_{\text{прив}}$  и качественный показатель готовых изделий из полученных смесей, в качестве которого принят предел прочности на сжатие бетонных образцов  $\sigma_{\text{сж}}$ .

На указанные параметры влияют следующие факторы:

$$P_{\text{прив}}, V_c, \sigma_{\text{сж}} = f(n, c, \alpha, d_0, h, b_l, L_l, V, z_{\text{ст}}, i, K_H, t), \quad (4.1)$$

где  $n$  – частота вращения вала,  $\text{с}^{-1}$ ;

$c$  – расстояние между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти, м;

$\alpha$  – угол установки лопасти относительно плоскости вращения, град;

$d_0$  – диаметр устанавливаемых стержневых элементов, м;

$h$  – высота стержневых элементов, м;

$b_l$  – ширина лопасти, м;

$L_l$  – высота лопасти, м;

$V$  – объем рабочей камеры смесителя, м<sup>3</sup>;

$z_{ст}$  – количество установленных стержневых элементов, шт.;

$i$  – количество лопастей смесителя, шт.;

$K_H$  – коэффициент заполнения рабочей камеры смесителя;

$t$  – время смешивания, с.

Производительность смесителя  $Q$  зависит от геометрических размеров смесителя, то есть от объема рабочей камеры  $V$  и коэффициента заполнения рабочей камеры смесителя  $K_H$ . Рациональное значение коэффициента заполнения корпуса смесителя согласно рекомендациям [97, 100] составляет  $K_H = 0,5 \dots 0,7$ . Исходя из рекомендаций, а также из рационального энергопотребления экспериментальной установки двухвального лопастного смесителя со стержневыми элементами коэффициент загрузки рабочей камеры смесителя принят  $K_H = 0,5$  для всех опытов.

В результате ранее проведенных с помощью программного продукта EDEM (глава 2) экспериментальных исследований установлены рациональная форма стержневых элементов (круглое сечение), а также их количество перед лопастью –  $z_{ст} = 2$  шт.

Время смешивания влияет на производительность смесителя и на качество готовой смеси. В результате проведения поисковых экспериментов установлено, что за время смешивания  $t=90$  с процесс смешивания переходит в установившееся состояние при возможных сочетаниях варьируемых параметров в рассматриваемых диапазонах их значений.

Количество лопастей  $i$ , ширина  $b_l$  и высота  $L_l$  каждой лопасти экспериментальной установки смесителя рассчитывалась по методике [100].

Так как уплотнение из смешиваемых компонентов возникает перед лопастью по всей её высоте, то высота стержневых элементов  $h$  должна быть равна высоте лопасти  $L_l$ .

Диаметр  $d_0$  устанавливаемых стержневых элементов цилиндрического профиля принимался исходя из рассчитанной ширины лопасти, рекомендаций [48], а также по результатам поисковых экспериментов в программной среде EDEM.

Установлено, что для максимальной крупности смешиваемых частиц  $8 \times 10^{-4}$  м, рациональный диаметр стержневых элементов составит  $d_0 = 5 \times 10^{-3}$  м.

В качестве варьируемых факторов при исследовании процесса смешивания в двухвальном смесителе выбраны параметры, осуществляющие непосредственное влияние на качество смесеприготовления – угол установки лопасти относительно плоскости вращения,  $\alpha$ , градус, частота вращения лопастных валов,  $n$ ,  $\text{с}^{-1}$  и расстояние  $s$ , мм, между рабочей поверхностью лопасти и установленными перед ней стержневыми элементами.

Угол установки лопасти относительно плоскости вращения оказывает влияние на мощность, потребляемую приводом смесителя, а также на размер уплотнения из смешиваемых компонентов перед рабочей поверхностью лопатки, при ее движении в смеси. С уменьшением угла  $\alpha$ , снижается величина потребляемой мощности, и уменьшается уплотнение перед лопастью. Вместе с этим, от угла установки лопасти зависит направление движения смешиваемых компонентов в смесителе, поэтому важно найти рациональное значение угла установки лопасти, при котором обеспечивалось бы наибольшее смещение частиц и объемов смеси относительно друг друга при минимальных затратах электроэнергии.

Частота вращения валов  $n$  оказывает прямое влияние на интенсификацию процесса смешивания, так как с увеличением числа оборотов лопастных валов двухвального смесителя увеличивается количество перемещаемых лопастями объемов материала в единицу времени. Однако при повышенных частотах вращения частички материала в момент выхода лопастей из смешиваемых компонентов будут выбрасываться центробежной силой инерции на разное расстояние, в зависимости от разности масс этих частиц, что может привести к обратному эффекту – процессу сегрегации. Также при повышении частоты вращения лопастных валов увеличивается потребляемая мощность привода. Поэтому важно выбрать рациональное число оборотов валов.

Расстояние между рабочей поверхностью лопасти и стержневыми элементами цилиндрического профиля  $s$  – один из важнейших параметров рабочих органов экспериментальной установки. С увеличением угла установки лопасти  $\alpha$ , от-

носителю плоскости вращения, увеличивается уплотнение из смешиваемых компонентов перед ее рабочей поверхностью. Стержневые элементы предназначены для деформации уплотнения из смешиваемых компонентов. С увеличением расстояния  $c$  воздействие стержневых элементов будет происходить дальше от лопасти, и материал снова образует уплотнение перед ней. А с уменьшением расстояния, возможно образование «заторов» из смешиваемых компонентов в области между стержнями и лопастями. Поэтому рациональное значение  $c$  должно быть найдено в результате проведения экспериментальных исследований.

Таким образом, для смесителя со стержневыми элементами основными факторами, влияющими на качество подготовки сухой смеси, являются частота вращения лопастных валов  $n$ , угол установки лопасти  $\alpha$  и расстояние между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти  $c$ .

#### 4.2 Результаты экспериментальных исследований в смесителе с установленными стержневыми элементами

Согласно принятому плану ПФЭ ЦКРП  $2^3$  установлено пять уровней варьирования принятых факторов (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Исследуемые факторы и уровни их варьирования ПФЭ ЦКРП  $2^3$

Факторы	Обозначение	Ед. измерения	Уровни варьирования					Интервал варьирования
			-1,680	-1	0	+1	+1,680	
Частота вращения валов, $n$	$X_1$	$c^{-1}$	0,66	0,8	1	1,2	1,34	0,2
Расстояние между стержнями и лопастью, $c$	$X_2$	м	0	$2,4 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
Угол установки лопастей, $\alpha$	$X_3$	град	19,92	24	30	36	40,08	3,57

Результаты экспериментальных исследований, проведенных согласно плану факторного эксперимента ПФЭ ЦКРП  $2^3$ , представлены в таблице 4.2.

Результаты, указанные в таблице 4.2, позволяют установить закономерность изменения коэффициента неоднородности,  $V_c$ , двухкомпонентной сухой смеси, предела прочности на сжатие,  $\sigma_{сж}$ , бетонных образцов, выполненных из этой смеси, а также мощности,  $P_{прив}$ , потребляемой приводом смесителя со стержневыми элементами в зависимости от варьируемых факторов. В результате обработки экспериментальных данных, получены уравнения регрессии, описывающие влияние указанных параметров на функции отклика.

Таблица 4.2 – Результаты эксперимента согласно плану ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup>

№ п/п	$n, с^{-1}$	$c, мм$	$\alpha, град$	$V_c, \%$	$\sigma_{сж}, МПа$	$P_{прив}, Вт$
1	0,8	2,43	24	4,37	18,16	30,36
2	1,2	2,43	24	4,01	19,39	130,53
3	0,8	9,57	24	7,87	21,86	31,47
4	1,2	9,57	24	4,44	16,56	134,78
5	0,8	2,43	36	4,85	19,32	101,39
6	1,2	2,43	36	4,96	18,25	280,39
7	0,8	9,57	36	14,48	21,08	98,47
8	1,2	9,57	36	5,65	19,34	285,37
9	0,66	6	30	8,35	16,12	29,59
10	1,34	6	30	3,15	13,29	288,66
11	1	0	30	4,45	18,53	120,37
12	1	12	30	9,35	18,13	128,37
13	1	6	19,92	4,31	21,86	27,34
14	1	6	40,08	8,51	23,78	210,37
15	1	6	30	2,97	24,12	108,37
16	1	6	30	3,40	23,96	110,67
17	1	6	30	4,95	23,47	105,39
18	1	6	30	3,57	24,10	111,47
19	1	6	30	3,98	24,86	109,39
20	1	6	30	3,02	22,12	111,37

По результатам оценки воспроизводимости параллельных опытов для определения  $V_c$ ,  $\sigma_{сж}$  и  $P_{прив.эксп.}$  установлено, что соответствующие значения критерия Кохрена, полученные в результате расчета,  $G_{V_c} = 0,139$ ,  $G_{\sigma_{сж}} = 0,196$  и  $G_{P_{прив.эксп.Т}} = 0,171$  меньше соответствующих табличных значений  $G_{V_c.Т} = 0,616$ ,  $G_{\sigma_{сж.Т}} = 0,616$  и  $G_{P_{прив.эксп.Т}} = 0,616$ .

Каждое из полученных уравнений регрессии было проверено на адекватность. Все уравнения регрессии адекватно описывают зависимости  $V_c$ ,  $\sigma_{сж}$  и  $P_{прив.эксп.}$ , так как соответствующие расчетные значения критерия Фишера

$F_{V_c} = 2,34$ ,  $F_{\sigma_{сж}} = 4,23$  и  $F_{P_{прив.эксп.}} = 4,84$  меньше соответствующих табличных значений  $F_{V_c.T} = 5,05$ ,  $F_{\sigma_{сж}.T} = 5,05$  и  $F_{P_{прив.эксп.}.T} = 5,05$ .

Для перехода уравнения из кодированного вида в натуральную форму была использована формула [98]:

$$X_i = \frac{x_H - x_{cp}}{\Delta}, \quad (4.2)$$

где  $X_i$  – обозначение фактора варьирования в кодированном виде;

$x_H$  – обозначение фактора варьирования в натуральном виде;

$x_{cp}$  – значение нулевого уровня варьирования фактора;

$\Delta$  – шаг варьирования.

Значения шага варьирования, а также факторов варьирования в натуральном виде и на нулевом уровне, представлены в таблице 4.1.

#### **4.2.1 Установление закономерностей изменения коэффициента неоднородности от варьлируемых факторов**

По результатам проведения экспериментальных исследований, было получено уравнение регрессии в кодированном виде, которое характеризует зависимость коэффициента неоднородности готовой смеси  $V_c$  от варьлируемых факторов  $X_1$  ( $n$ ),  $X_2$  ( $c$ ),  $X_3$  ( $\alpha$ ):

$$V_c = 4,024 - 1,518 \cdot X_1 + 1,606 \cdot X_2 + 1,165 \cdot X_3 - 1,43 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,587 \times \\ \times X_1 \cdot X_3 + 0,761 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,515 \cdot X_1^2 + 0,902 \cdot X_2^2 + 0,737 \cdot X_3^2 \quad (4.3)$$

Значимыми были признаны все коэффициенты. Анализируя значения коэффициентов в уравнении регрессии кодированной формы, можно прийти к выводу, что максимальное влияние на качество смесеприготовления оказывает факторы  $X_1$  и  $X_2$ . Увеличение значений фактора  $X_1$  (частота вращения лопастных валов) приводит к уменьшению  $V_c$  вследствие более частого воздействия перемешивающих органов на компоненты смеси, а увеличение значений фактора  $X_2$  (расстояние между рабочей поверхностью лопасти и стержневыми элементами) повышает значение коэффициента неоднородности по причине того, что с увеличением расстояния от рабочей поверхности лопасти до стержней, уменьшается воздействие

стержневых элементов на уплотнение, возникающее перед лопастью. Также значительно оказывающим влияние является коэффициент перед парными факторами  $X_1 \cdot X_2$ .

После преобразований с помощью выражения (4.2) было получено уравнение регрессии в натуральном виде:

$$V_c = 16,641 - 6,648 \cdot n + 0,538 \cdot c - 0,758 \cdot \alpha - 2,003 \cdot n \cdot c - 0,489 \cdot n \cdot \alpha + \\ + 0,026 \cdot c \cdot \alpha + 12,875 \cdot n^2 + 0,071 \cdot c^2 + 0,020 \cdot \alpha^2 \quad (4.4)$$

С помощью программной среды «Maple» построены зависимости коэффициента неоднородности от угла установки лопасти к плоскости вращения  $\alpha$  и расстояния между рабочей поверхностью лопасти и стержневыми элементами  $c$  (рисунок 4.1, а), от частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  (рисунок 4.1, б), а также от расстояния  $c$  и частоты вращения  $n$  (рисунок 4.1, в).

На рисунке 4.1, а видно, что значения коэффициента неоднородности изменяются от 3,21 до 15,46 %. Поверхность функции, описывающая коэффициент неоднородности, параболическая. Область с наименьшими значениями коэффициента неоднородности  $V_{cminl}=3,21\%$  достигается при  $c=3,5$  мм, и  $\alpha=27^\circ$ . Рост коэффициента неоднородности происходит от значений  $c=3,5$  мм, и  $\alpha=27^\circ$ , к минимальным и максимальным значениям  $c$  и  $\alpha$  согласно плану проведения эксперимента. Максимальное значение  $V_{cmaxl}=15,46\%$  соответствует максимальному значению расстояния от стержневых элементов до рабочей поверхности лопасти ( $c=12$  мм) и максимальному значению угла установки лопасти относительно плоскости вращения ( $\alpha=40^\circ$ ). Это обуславливается тем, что при повышении угла установки лопасти увеличивается площадь контакта рабочих органов со смешиваемым материалом. Стержневые элементы на расстоянии 12 мм при максимальной крупности смешиваемых компонентов 0,8 мм, не воздействуют эффективно на образующееся уплотнение, так как границы уплотнения меньше, чем расстояние от рабочей поверхности лопасти до стержневых элементов.

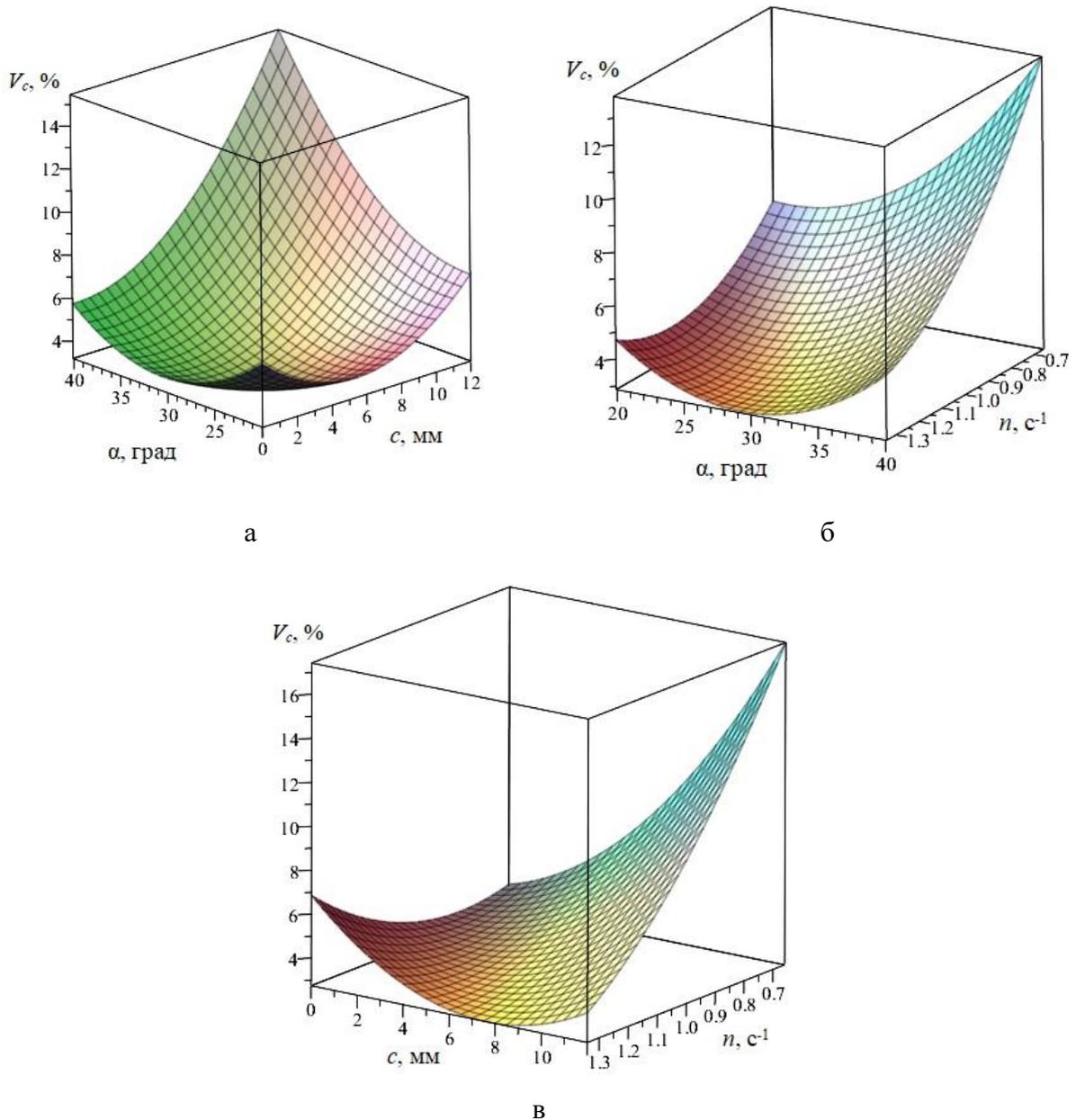


Рисунок 4.1. Зависимости коэффициента неоднородности от варьируемых факторов: а – расстояния между рабочей поверхностью лопасти и стержневыми элементами  $c$  и угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha$ , при  $n=1 \text{ с}^{-1}$ ; б – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$ , при  $c=6 \text{ мм}$ ; в – расстояния между рабочей поверхностью лопасти и стержневыми элементами  $c$  и частоты вращения лопастных валов  $n$ , при  $\alpha=30^\circ$ .

С уменьшением расстояния  $c$  и угла  $\alpha$  до значений, расположенных в центре плана эксперимента, наблюдается снижение коэффициента неоднородности  $V_c$ . Так при  $c=8 \text{ мм}$ ,  $\alpha=35^\circ$  –  $V_c=7,04\%$ , при  $c=7 \text{ мм}$ ,  $\alpha=30^\circ$  –  $V_c=4,54\%$ , а при значениях  $c=6 \text{ мм}$ ,  $\alpha=25^\circ$  коэффициент неоднородности равен  $V_c=3,56\%$ . Постепенное снижение значения  $V_c$  связано с уменьшением размера уплотнения из смешиваемых

компонентов, из-за уменьшения угла установки лопасти [59, 95]. Это происходит из-за небольших значений угла установки лопасти  $\alpha$ , а также из-за активного воздействия стержневых элементов, на возникающее уплотнение.

При дальнейшем уменьшении угла установки лопасти и расстояния от рабочей поверхности лопасти до стержневых элементов наблюдается рост значений коэффициента неоднородности. Так при  $c=0$  мм,  $\alpha=20^\circ$  –  $V_c=6,11\%$ . Это объясняется тем, что при таком угле установки лопасти количество материала, которое захватывает лопасть, уменьшается. А при нулевом расстоянии между лопастью и стержневыми элементами возникают застойные зоны с каждой стороны от стержневых элементов, что также ведет к ухудшению качества готовой смеси.

Из рисунка 4.1, б, следует, что значения коэффициента неоднородности расположены в диапазоне от 13,81 % до 2,87 %. Поверхность функции является непрерывной, рациональные значения коэффициента неоднородности  $V_c=2,87\%$  достигаются при  $n=1,26$  с<sup>-1</sup>, и  $\alpha=28,4^\circ$ . Максимальное значение  $V_c=13,81\%$  достигается при  $n=0,66$  с<sup>-1</sup>, и  $\alpha=40^\circ$ . Это объясняется тем, что при низком количестве оборотов лопастных валов уменьшается в единицу времени количество воздействий рабочих органов на компоненты смеси, а в комплексе с максимальным углом установки лопасти, согласно плану эксперимента, перед лопастью создается наибольшее уплотнение из компонентов смеси. Низкая частота вращения лопастных валов и максимальный угол установки лопасти – наиболее существенное сочетание факторов и их величин, которые оказывают отрицательное влияние на однородность смеси.

При уменьшении угла установки лопасти  $\alpha$  и увеличении частоты вращения лопастных валов  $n$  наблюдается уменьшение значений коэффициента неоднородности. Так при  $\alpha=35^\circ$  и  $n=0,8$  с<sup>-1</sup> коэффициент неоднородности  $V_c=8,02\%$ . При дальнейшем уменьшении  $\alpha$  и увеличении  $n$  до значений  $30^\circ$  и  $0,9$  с<sup>-1</sup> соответственно, –  $V_c=4,91\%$ . При  $\alpha=25^\circ$  и  $n=1$  с<sup>-1</sup> коэффициент неоднородности –  $V_c=3,56\%$ . Это связано с возрастающим числом воздействий на смесь рабочих органов смесителя, а также уменьшением уплотнения из смешиваемых компонентов перед рабочей поверхностью каждой из лопастей.

Дальнейшее повышение частоты вращения лопастных валов при наименьшем и наибольшем значениях угла установки лопасти  $\alpha$  приводит к ухудшению качества готовой смеси. Так, при  $n=1,2 \text{ с}^{-1}$  и углах установки лопасти  $\alpha=40^\circ$  и  $\alpha=20^\circ$  коэффициент неоднородности принимает значения  $V_c=6,03 \%$  и  $V_c=4,1 \%$ , соответственно. При повышенных частотах вращения и увеличении значений угла установки лопастей ухудшается однородность смеси. Это объясняется увеличением размера уплотнения из смешиваемых компонентов перед рабочими поверхностями лопастей. При повышенной частоте вращения и малых значениях угла лопастей происходит уменьшение доли конвективного смешивания за счет снижения объемов смеси, захватываемых лопастями. Только при  $\alpha=30^\circ$  и  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$  наблюдается устойчивое низкое значение коэффициента неоднородности –  $V_c=2,93\%$ , что свидетельствует о рациональном значении угла установки лопастей при  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$ .

На рисунке 4.1, в, видно, что значения коэффициента неоднородности находятся в диапазоне от 2,74 % до 17,43 %. Поверхность функции непрерывна, минимальное значение коэффициента неоднородности  $V_c=2,74\%$  достигается при значениях частоты вращения лопастных валов  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$  и расстоянии от лопасти до стержневых элементов  $c=7 \text{ мм}$ . Повышение значений коэффициента неоднородности наблюдается при значениях варьируемых факторов в «звездных точках» согласно принятому плану эксперимента. Максимальное значение  $V_c=17,43\%$  принимает при наибольшем расстоянии  $c=12 \text{ мм}$  и минимальном значении частоты вращения лопастных валов  $n=0,66 \text{ с}^{-1}$ . Это можно объяснить тем, что низкая частота воздействия рабочих органов на смешиваемые компоненты и чрезмерная удаленность стержневых элементов от рабочей поверхности лопасти не препятствует возникновению уплотнения перед лопастью, а, следовательно, не обеспечивает интенсификацию процесса смешивания.

С повышением частоты вращения  $n$  значение коэффициента неоднородности снижается. Так, при максимальном значении расстояния от стержневых элементов до рабочей поверхности лопасти  $c=12 \text{ мм}$  и при частотах вращения  $n=1 \text{ с}^{-1}$ ,  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$  коэффициент неоднородности принимает соответственно следующие

значения:  $V_c=9,27\%$  и  $V_c=4,09\%$ . Это свидетельствует о существенном влиянии частоты вращения на повышение однородности готовой смеси. При нулевом значении расстояния  $c$  наблюдается снижение коэффициента неоднородности, в том числе при низких частотах вращения. Так, при  $n=0,66 \text{ с}^{-1}$  и  $c=0 \text{ мм}$  –  $V_c=4,89\%$ , однако, при последовательном увеличении частоты вращения валов, коэффициент неоднородности возрастает. Так, при частотах вращения  $n=1 \text{ с}^{-1}$  и  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$  коэффициент неоднородности принимает значения соответственно  $V_c=4,97\%$  и  $V_c=6,87\%$ . Рост значений  $V_c$  связан с тем, что прижатые стержневые элементы к рабочей поверхности лопасти не воздействуют на возникающее уплотнение из смешиваемых компонентов при вышеуказанных значениях частоты вращения лопастных валов  $n$ .

При максимальных значениях частоты вращения лопастных валов и постепенном увеличении расстояния от стержневых элементов до рабочей поверхности лопасти значения коэффициента неоднородности уменьшаются. Так, при частоте вращения  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$  и значениях  $c=6 \text{ мм}$ ,  $c=7 \text{ мм}$ ,  $c=8 \text{ мм}$  и  $c=9 \text{ мм}$  коэффициент неоднородности принимает соответственно следующие значения:  $V_c=2,93\%$ ,  $V_c=2,77\%$ ,  $V_c=2,75\%$  и  $V_c=2,88\%$ . При дальнейшем увеличении  $c$  наблюдается рост коэффициента неоднородности. Это свидетельствует о том, что при повышенных оборотах лопастных валов, наиболее эффективное воздействие на уплотнение из смешиваемых компонентов происходит при значениях  $c$  близких к указанным в центре плана эксперимента.

С помощью программного продукта «*Maple*» были найдены минимумы и максимумы функции в зависимости от сочетания трех факторов. Так максимальный коэффициент неоднородности смеси  $V_{cmax}=17,43\%$  достигается при значении варьируемых факторов  $n=0,66 \text{ с}^{-1}$ ,  $c=12 \text{ мм}$ ,  $\alpha=40^\circ$ . Минимальное значение  $V_{cmin}=2,63\%$  достигается при значениях  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$ ,  $c=8 \text{ мм}$ ,  $\alpha=27^\circ$  [61].

#### 4.2.2 Исследование прочности изделий из смеси, получаемой в смесителе со стержневыми элементами

Согласно результатам экспериментальных исследований в смесителе с установленными стержневыми элементами получено уравнение регрессии в кодированном виде, которое характеризует зависимость предела прочности на сжатие бетонных образцов из полученной смеси от варьируемых факторов  $X_1$  ( $n$ ),  $X_2$  ( $c$ ),  $X_3$  ( $\alpha$ ).

Коэффициент  $(0,15 \cdot X_1 \cdot X_3)$  определен как незначимый и был исключен из уравнения. Уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$\sigma_{сж} = 24,874 - 0,831 \cdot X_1 + 0,218 \cdot X_2 + 0,375 \cdot X_3 - 0,857 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,236 \cdot X_2 \cdot X_3 - 3,438X_1^2 - 2,22 \cdot X_2^2 - 0,712 \cdot X_3^2 \quad (4.5)$$

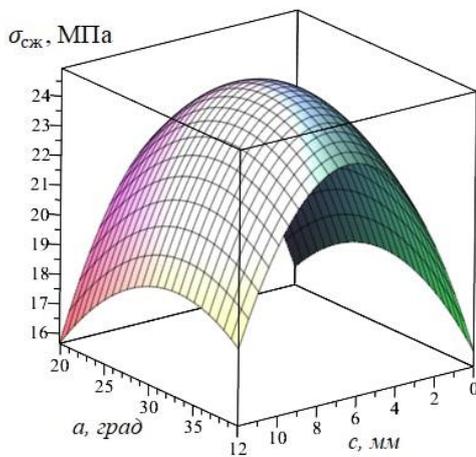
Значения коэффициентов уравнения регрессии (4.4) показывают, что одиночный коэффициент при  $X_1$  оказывает наибольшее влияние на прочностные характеристики бетонных образцов, имея значение  $-0,831$ . Значительное влияние оказывает коэффициент при парном сочетании факторов  $X_1$  и  $X_2$  со значением  $-0,857$ . Большое влияние на прочностные характеристики готовых изделий оказывают коэффициенты при квадратичных факторах  $X_1$  и  $X_2$  со значениями соответственно  $-3,438$  и  $-2,22$ .

С помощью выражения (4.2) уравнение регрессии (4.5) переведено в натуральный вид:

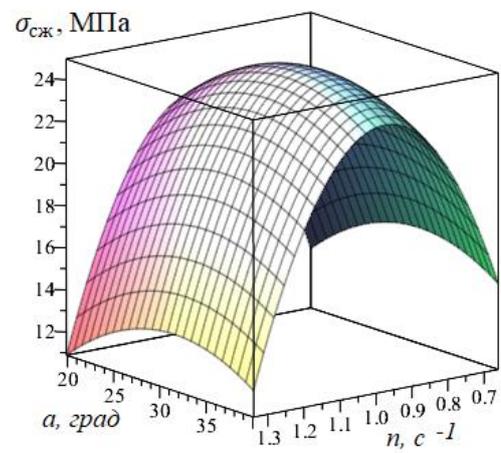
$$\sigma_{сж} = -88,45 + 174,95 \cdot n + 3,02 \cdot c + 1,18 \cdot \alpha - 1,2 \cdot n \cdot c + 0,01 \cdot c \cdot \alpha - 85,95 \cdot n^2 - 0,174 \cdot c^2 - 0,02 \cdot \alpha^2 \quad (4.6)$$

С помощью программного продукта «Maple» построены и проанализированы зависимости предела прочности на сжатие бетонных образцов от угла установки лопасти к плоскости вращения  $\alpha$  и расстояния между рабочими поверхностями лопасти и стержневыми элементами  $c$  (рисунок 4.2, а), от частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  (рисунок 4.2, б), а также от расстояния  $c$  и частоты вращения  $n$  (рисунок 4.2, в).

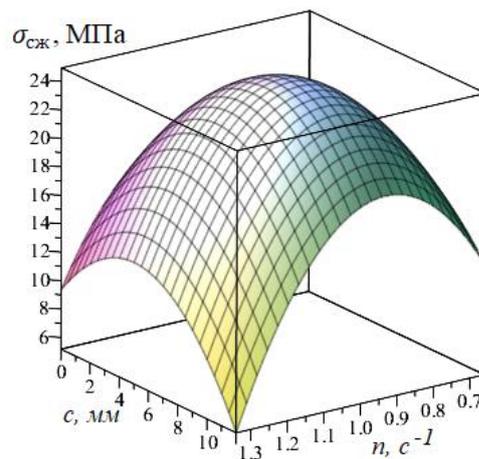
Значения предела прочности на сжатие бетонных образцов в зависимости от расстояния  $s$  и угла установки лопасти  $\alpha$  (рисунок 4.2, а) находятся в диапазоне от 15,66 МПа до 24,93 МПа. Поверхность графика функции отклика параболическая, максимальные показатели функция отклика принимает при значениях варьируемых факторов, которые соответствуют центральной части плана эксперимента. При удалении значений расстояния  $s$  и угла  $\alpha$  от соответствующих центральной части факторного пространства показатели предела прочности на сжатие бетонных образцов уменьшаются.



а



б



в

Рисунок 4.2 Зависимость предела прочности на сжатие бетонных образцов от:  
 а – расстояния между рабочей поверхностью лопасти  $s$  и стержневыми элементами и угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha$  при  $n=1 \text{ с}^{-1}$ ; б – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $s=6 \text{ мм}$ ; в – расстояния между лопастью и стержневыми элементами  $s$  и частоты вращения лопастных валов  $n$  при  $\alpha=30^\circ$

Максимальное значение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24,93$  МПа достигается при значении  $c=6$  мм и  $\alpha=31^\circ$ . Это обуславливается рациональным сочетанием варьируемых факторов, при котором стержневые элементы максимально положительно влияют на уплотнение, возникающее перед лопастью, деформируя его, интенсифицируя при этом процесс смешивания. Минимальное значение предела прочности  $\sigma_{сж}=15,66$  МПа достигается при минимальном угле установки лопасти  $\alpha=20^\circ$  и максимальном расстоянии  $c=12$  мм. При уменьшении угла установки лопасти уменьшается доля конвективного смешивания, при этом уплотнение перед лопаткой практически не образуется и воздействие на смесь стержневых элементов, при расположении на максимальном удалении от рабочей поверхности лопасти, неэффективно.

При изменении значений варьируемых факторов в большую или меньшую сторону от центра плана наблюдается снижение предела прочности на сжатие бетонных образцов.

На рисунке 4.2, б, значения предела прочности на сжатие бетонных образцов  $\sigma_{сж}$  находятся в диапазоне от 10,89 МПа до 24,97 МПа. График функции отклика имеет параболическую форму поверхности. Максимальные значения функции отклика достигаются при значениях варьируемых факторов, расположенных в центре плана эксперимента. Минимальные значения прочностная характеристика бетонных образцов принимает при крайне малых и крайне высоких значениях частоты вращения лопастных валов  $n$ .

Максимальное значение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24,97$  МПа достигается при угле установки лопасти  $\alpha=31,5^\circ$  и частоте вращения лопастных валов  $n=0,98$  с<sup>-1</sup>. При данном сочетании варьируемых факторов происходит интенсивное влияние рабочих органов на смешиваемые компоненты, позволяющее деформировать уплотнение смеси у рабочей поверхности лопасти, тем самым увеличить качество готовой смеси, и, следовательно, повысить прочностные характеристики готового продукта. Минимальное значение прочности на сжатие бетонных образцов  $\sigma_{сж}=10,86$  МПа обеспечивается при  $\alpha=20^\circ$  и частоте вращения лопастных валов  $n=1,34$  с<sup>-1</sup>. Это объясняется снижением доли конвективного сме-

шивания за счет вдавливания слоя одного из смешиваемых компонентов в слой другого компонента.

Стоит отметить, что при частоте вращения лопастных валов близкой к центральным значениям согласно плану эксперимента, предел прочности на сжатие при исследуемых диапазонах значений угла установки лопастей принимает достаточно высокие значения. Так, при  $n=1 \text{ с}^{-1}$  и углах установки лопасти  $\alpha=20^\circ$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\alpha=40^\circ$  предел прочности на сжатие составляет соответственно  $\sigma_{\text{сж}}=22,27 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{сж}}=24,87 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{сж}}=23,52 \text{ МПа}$ . Это свидетельствует о важном влиянии выбора скоростного режима рабочих органов смесителя на прочностные характеристики готового продукта. Сочетание скоростного параметра при значении  $n=1 \text{ с}^{-1}$  и расстояния от рабочей поверхности лопасти до стержневых элементов  $c=6 \text{ мм}$  приводит к наиболее рациональному массообмену между смешиваемыми компонентами.

Данный вывод находит подтверждение на рисунке 4.2, в, где показана зависимость предела прочности на сжатие бетонных образцов от частоты вращения лопастных валов  $n$  и расстояния от стержневых элементов до рабочей поверхности лопасти  $c$ . Как и в предыдущих двух графиках, форма графика поверхности функции отклика параболическая. Максимум функции приходится на значения варьируемых факторов близких к центральным согласно плану эксперимента. Значения предела прочности на сжатие опытных бетонных образцов находятся в диапазоне от 5,17 МПа до 24,94 МПа. Минимальные показатели предела прочности на сжатие характерны для максимальных и минимальных значений варьируемых факторов.

Наибольшее значение предела прочности на сжатие  $\sigma_{\text{сж}}=24,94 \text{ МПа}$  бетонных образцов достигается при  $n=0,97 \text{ с}^{-1}$  и  $c=6,26 \text{ мм}$ . Это обусловлено максимально эффективным воздействием лопасти и установленных перед ней стержневых элементов на смешиваемые компоненты при заданной частоте вращения валов. Минимальное значение прочности  $\sigma_{\text{сж}}=5,17 \text{ МПа}$  достигается при  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$  и  $c=12 \text{ мм}$ . Такое низкое значение прочностных характеристик связано с неэффективным воздействием стержневых элементов на уплотнение из смешиваемых

компонентов. При высоких оборотах вращения лопастного вала и максимальном расстоянии от лопасти до стержневых элементов, материал, проходя через стержневые элементы, образует уплотнение перед рабочей поверхностью лопасти, тем самым снижая интенсивность смешивания, а, следовательно, и прочностные характеристики готового продукта.

С помощью программной среды «Maple» были найдены минимумы и максимумы функции в зависимости от сочетания трех факторов. Так максимальная прочность на сжатие бетонных образцов  $\sigma_{сж.мах}=24,99$  МПа достигается при значении варьируемых факторов  $n=0,97$  с<sup>-1</sup>,  $c=6,32$  мм,  $\alpha=31,67^\circ$ . Минимальное значение  $\sigma_{сж min}=5,05$  МПа достигается при значениях  $n=1,34$  с<sup>-1</sup>,  $c=12$  мм,  $\alpha=20^\circ$  [114].

#### 4.2.3 Зависимость мощности, потребляемой приводом смесителя от варьируемых параметров

По результатам эксперимента было получено уравнение регрессии, описывающее изменение потребляемой мощности привода двухвального горизонтального лопастного смесителя со стержневыми элементами цилиндрического профиля, установленными перед рабочими поверхностями лопастей, в зависимости от варьируемых параметров. Факторы парного взаимодействия  $X_1 \cdot X_2$  и  $X_2 \cdot X_3$  были определены как пренебрежимо малые и были исключены из уравнения.

$$P_{\text{прив.эксп.}} = 109,54 + 73,54 \cdot X_1 + 1,53 \cdot X_2 + 54,61 \cdot X_3 + 20,3 \cdot X_1 \cdot X_3 + 17,66 \cdot X_1^2 + 5,39 \cdot X_2^2 + 3,45 \cdot X_3^2 \quad (4.7)$$

Как видно из уравнения, наиболее значимо влияющими на увеличение потребляемой мощности являются факторы  $X_1$  и  $X_3$ . Рост значений этих факторов, приводит к соответствующему росту мощности привода смесителя. Это объяснимо, так как при повышении частоты вращения лопастных валов  $n$  и увеличении угла  $\alpha$  установки лопасти относительно плоскости вращения, затраты электроэнергии повышаются.

В натуральном виде уравнение (4.7) будет выглядеть так:

$$P_{\text{прив.экс.}} = 516,63 - 1022,73 \cdot n - 4,65 \cdot c - 13,56 \cdot \alpha + 16,92 \cdot n \cdot \alpha + 441,43 \times \\ \times n^2 + 0,42 \cdot c^2 + 0,096 \cdot \alpha^2 \quad (4.8)$$

На рисунке 4.3 показаны зависимости потребляемой приводом мощности смесителя от варьируемых факторов.

Зависимость мощности  $P_{\text{прив.экс.}}$  от частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при расстоянии между рабочей поверхностью лопасти и стержневыми элементами  $c=6$  мм отображена на рисунке 4.3, а. Исходя из характера зависимости можно сделать вывод, что потребляемая мощность увеличивается при повышении частоты вращения двигателя и увеличении значений угла установки лопастей относительно плоскости вращения.

Минимальное значение потребляемой мощности  $P_{\text{прив.экс.}}$  составляет 20 Вт при угле  $\alpha=20^\circ$  и частоте вращения лопастных валов  $n=0,68 \text{ с}^{-1}$ . Максимальная потребляемая мощность  $P_{\text{прив.экс.}}=452$  Вт достигается при  $\alpha=40^\circ$  и  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$ .

Так при фиксированном значении  $n=0,64 \text{ с}^{-1}$  и изменяющихся значениях угла установки лопасти  $\alpha=25^\circ$ ,  $\alpha=35^\circ$ ,  $\alpha=40^\circ$  мощность привода  $P_{\text{прив.экс.}}$  соответственно принимает значения:  $P_{\text{прив.экс.}}=22$  Вт,  $P_{\text{прив.экс.}}=52$  Вт,  $P_{\text{прив.экс.}}=74$  Вт. Разница между максимальным и минимальным значениями потребляемой мощности составляет 52 Вт.

При увеличении частоты вращения до  $n=1 \text{ с}^{-1}$  и выбранных значениях угла установки лопасти  $\alpha$  значения потребляемой приводом мощности будут соответственно равны:  $P_{\text{прив.экс.}}=66$  Вт,  $P_{\text{прив.экс.}}=110$  Вт,  $P_{\text{прив.экс.}}=210$  Вт. Разница между максимальным и минимальным значениями составляет 144 Вт.

При наибольшем значении частоты вращения  $n=1,34 \text{ с}^{-1}$ , и рассматриваемых значениях угла установки лопасти  $\alpha$  мощность  $P_{\text{прив.экс.}}$  соответственно будет равна:  $P_{\text{прив.экс.}}=220$  Вт,  $P_{\text{прив.экс.}}=292$  Вт,  $P_{\text{прив.экс.}}=452$  Вт. Разница между минимумом и максимумом значений потребляемой мощности составляет 232 Вт.

Зависимость мощности  $P_{\text{прив.экс.}}$  от расстояния между рабочей поверхностью лопасти  $c$  и стержневыми элементами и угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha$  изображен на рисунке 4.3, б. Поверхность графика потреб-

ляемой мощности слегка вогнута в диапазоне значений  $c=3...7$  мм. При указанном диапазоне значений расстояния от рабочей поверхности лопасти до стержневых элементов наблюдается уменьшение потребляемой мощности. Это связано с активным воздействием установленных стержневых элементов на уплотнение из смешиваемых материалов перед лопастью. В указанном диапазоне  $c$  происходит наиболее эффективное разрыхление материала из смешиваемых компонентов. Это делает смесь менее плотной, что приводит к уменьшению мощности, затрачиваемой приводом. На минимальном и максимальном расстояниях  $c$  воздействие стержневых элементов на уплотнение снижается. Так, при значении  $c=6$  мм и рассматриваемых диапазонах угла установки лопасти, потребляемая мощность  $P_{прив.эксп.}$  снижается на 21,42 % при частоте вращения валов  $n=0,65$  с<sup>-1</sup>. При аналогичном значении  $c$  и повышении частоты вращения до значений  $n=1,34$  с<sup>-1</sup> мощность  $P_{прив.эксп.}$  снижается всего на 7,48 % по сравнению с мощностью, потребляемой приводом при  $c=12$  мм.

При фиксированном значении  $\alpha=25^\circ$  и диапазоне значений расстояния  $c=0$  мм,  $c=6$  мм,  $c=12$  мм мощность привода  $P_{прив.эксп.}$  соответственно принимает значения:  $P_{прив.эксп.}=79$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=66$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=84$  Вт. Разница между максимальным и минимальным значениями функции составляет 18 Вт.

Повышение значения угла установки лопасти  $\alpha$  до  $30^\circ$  при аналогичных значениях  $c$ , приводит соответственно к следующим численным значениям потребляемой приводом мощности:  $P_{прив.эксп.}=122$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=109$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=127$  Вт. Разница между большим и меньшим значениями потребляемой мощности составляет 18 Вт.

При максимальном значении  $\alpha=40^\circ$  и принятых ранее значениях расстояния от рабочей поверхности лопасти до стержневых элементов потребляемая приводом мощность соответственно составит:  $P_{прив.эксп.}=223$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=210$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=227$  Вт. Разница между наименьшим и наибольшим значениями потребляемой мощности составляет 17 Вт.

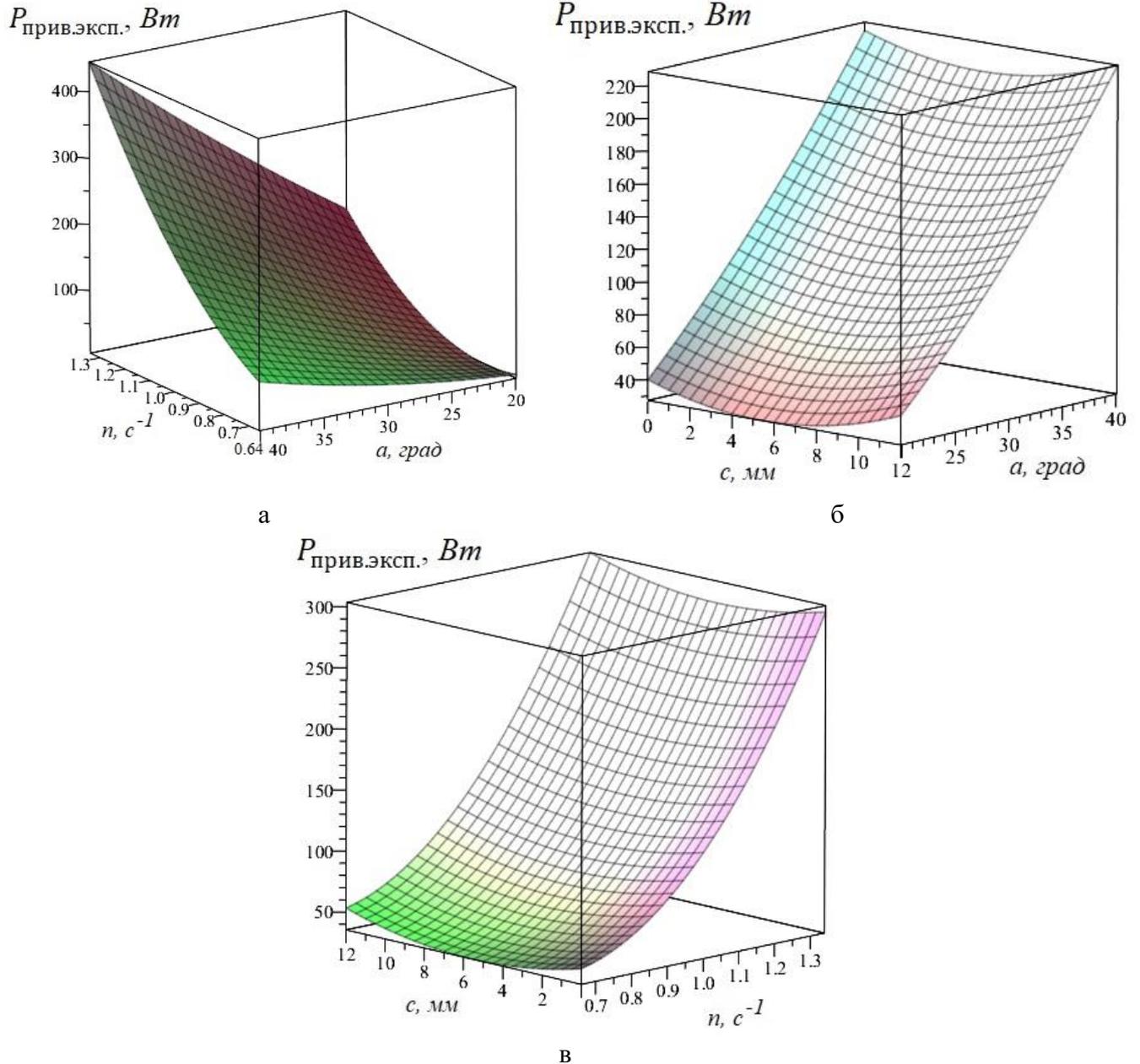


Рисунок 4.3 Зависимость мощности, потребляемой приводом двухвального смесителя, от:  
 а – частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопасти  $\alpha$  при  $c=6$  мм;  
 б – расстояния между рабочей поверхностью лопасти  $c$  и стержневыми элементами и угла  
 установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha$  при  $n=1 \text{ с}^{-1}$ ;  
 в – расстояния между лопастью и стержневыми элементами  $c$  и частоты вращения лопастных  
 валов  $n$  при  $\alpha=30^\circ$

На рисунке 4.3, в, продемонстрирован график зависимости потребляемой мощности приводом от частоты вращения  $n$  и расстояния между рабочей поверхностью лопасти  $c$  и стержневыми элементами. Поверхность графика вогнута при значениях  $c=3\dots 7$  мм. Его поведение также объясняется тем, что в указанном диапазоне расстояний, происходит наиболее интенсивное воздействие стержне-

вых элементов на уплотнение, уменьшая при этом плотность смешиваемого материала перед лопастями. Так, при значениях  $c=6$  мм и  $n=0,65$  с<sup>-1</sup>,  $P_{прив.эксп.}$  снижается на 30,36 %. При значениях  $n=0,8...1,34$  с<sup>-1</sup> мощность  $P_{прив.эксп.}$  снижается на 5,81 %, что свидетельствует о незначительном влиянии расстояния  $c$  на потребляемую приводом смесителя мощность при повышенных частотах вращения лопастных валов.

При фиксированном значении  $n=0,7$  с<sup>-1</sup> и значениях  $c=0$  мм,  $c=6$  мм,  $c=12$  мм мощность привода соответственно примет следующие значения:  $P_{прив.эксп.}=52$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=39$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=56$  Вт. Разница между большим и меньшим значениями мощности составляет 17 Вт.

При повышении частоты вращения до значения  $n=1$  с<sup>-1</sup> и аналогичном диапазоне значений расстояния  $c$  мощность, затрачивая приводом на процесс смешивания, соответственно составит:  $P_{прив.эксп.}=122$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=109$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=127$  Вт. Разница между большим и меньшим значениями мощности составляет 18 Вт.

При максимальной частоте вращения лопастных валов  $n=1,34$  с<sup>-1</sup> и исследуемом диапазоне расстояния  $c$  мощность  $P_{прив.эксп.}$  соответственно будет равна:  $P_{прив.эксп.}=305$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=292$  Вт,  $P_{прив.эксп.}=310$  Вт. Разница между максимальным и минимальным значениями потребляемой мощности составляет 18 Вт.

#### **4.2.4 Определение рациональных значений конструктивно-технологических параметров смесителя со стержневыми элементами**

Полученные уравнения регрессии (4.4), (4.6) и (4.8) позволяют определить области рациональных конструктивно-технологических параметров смесителя со стержневыми элементами при подготовке цементно-песчаной смеси.

Для этого необходимо в совокупности рассмотреть зависимости функций отклика, отвечающие за качество готовой смеси, (коэффициента неоднородности  $V_c$  и предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ ) от каждого варьируемого параметра (ча-

стоты вращения лопастных валов  $n$ , расстояния  $s$  между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти и угла установки лопасти  $\alpha$ ) в отдельности.

На потребляемую мощность смесителем расстояние между лопастью и стержневыми  $s$  элементами большого влияния не оказывает. При увеличении частоты вращения и значений угла установки лопасти мощность возрастает практически линейно. Область рациональных значений, при которых она стремится к минимуму, будет при минимальных значениях  $n$  и  $\alpha$ . Поэтому рассматривать область рациональных значений для мощности, потребляемой приводом смесителя и описываемой выражением (4.8), нецелесообразно.

Показатели коэффициента неоднородности важны для смесей, в которых равномерное распределение компонентов между собой играет значимую роль в технологическом процессе. Примером может служить приготовление шихты в стекольной промышленности. Сырьевая смесь с низким коэффициентом неоднородности позволяет затратить меньше энергии на её плавку в стекловаренной печи. В связи с этим особое внимание следует уделить значениям варьируемых факторов, при которых получается смесь с наименьшими показателями коэффициента неоднородности  $V_c$ .

Для смесей на цементном вяжущем, как правило, важна прочностная характеристика изделий, приготавливаемых из полученной смеси. К примеру, цементно-песчаная смесь может служить исходным продуктом для приготовления штукатурного или кладочного раствора. Для таких смесей важнейшее значение имеет показатель максимального предела прочности на сжатие. Этот параметр контролируется ГОСТ 58277–2018, как один из качественных показателей сухих смесей на цементном вяжущем. При твердении изделий из приготовленного раствора в результате термохимических реакций происходит образование пористой структуры цементного камня с расположенным в ее среде заполнителем из частиц кварцевого песка. Особенности сформированной структуры вносят изменения в прочностные характеристики этих изделий. Поэтому предел прочности на сжатие является важным показателем для строительных смесей, приготовленных на цементном, гипсовом или известковом вяжущем.

С учетом вышеописанного для определения рациональных параметров необходимо учитывать следующие два условия:

$$V_c \rightarrow \min; \quad (4.9)$$

$$\sigma_{сж} \rightarrow \max; \quad (4.10)$$

На рисунке 4.4 показаны зависимости коэффициента неоднородности, а также предела прочности на сжатие от частоты вращения лопастных валов.

Зона рациональных значений частоты вращения для достижения максимального предела прочности на сжатие заштрихована и обозначена буквой «А». Максимальный диапазон значений предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=22...24,99$  МПа достигается при диапазоне частоты вращения  $n=0,8...1,15$  с<sup>-1</sup>.

Зона рациональных значений частоты вращения для достижения минимального коэффициента неоднородности заштрихована и обозначена буквой «Б». Минимальный диапазон значений коэффициента неоднородности сухой смеси  $V_c=2,9...3,5$  % достигается при диапазоне частоты вращения  $n=1,15...1,34$  с<sup>-1</sup>.

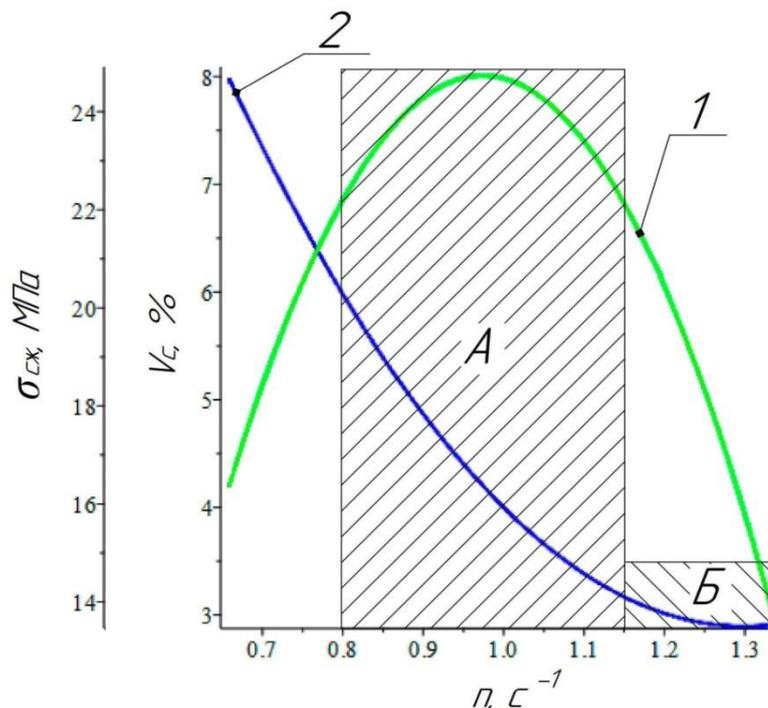


Рисунок 4.4. Графики зависимости функций отклика от частоты вращения  $n$ :  
1 – предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ ; 2 – коэффициента неоднородности  $V_c$

На рисунке 4.5 показаны зависимости функций отклика от угла установки лопасти относительно плоскости вращения.

Зона рациональных значений угла установки лопасти относительно плоскости вращения для достижения максимального предела прочности на сжатие заштрихована и обозначена буквой «А». Максимальный диапазон значений предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24,5\dots24,85$  МПа достигается при диапазоне значений угла установки лопасти  $\alpha=27\dots36^\circ$ .

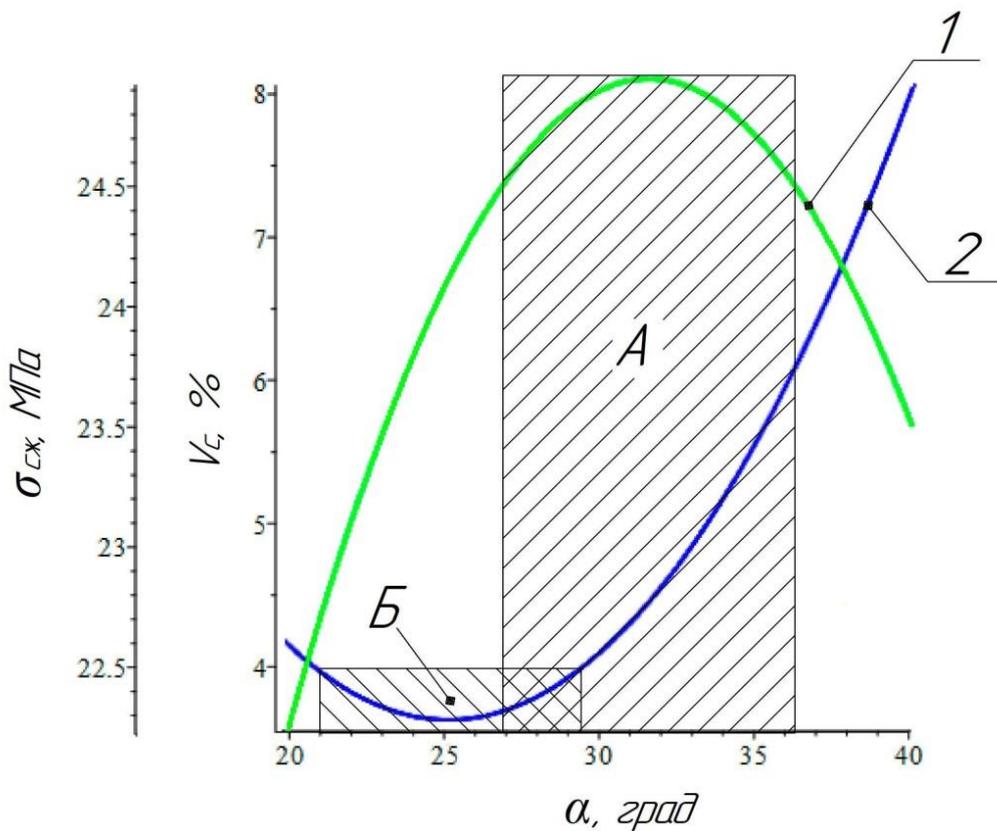


Рисунок 4.5. Графики зависимости функций отклика от угла установки лопасти  $\alpha$ :  
1 – предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ ; 2 – коэффициента неоднородности  $V_c$

Зона рациональных значений угла установки лопасти для достижения минимального коэффициента неоднородности заштрихована и обозначена буквой «Б». Минимальный диапазон значений коэффициента неоднородности сухой смеси  $V_c=3,5\dots4,0\%$  достигается при диапазоне значений угла установки лопасти  $\alpha=22\dots29^\circ$ .

На рисунке 4.6 показаны зависимости функций отклика от расстояния между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти.

Зона рациональных значений расстояния между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти для достижения максимального предела прочности на сжатие заштрихована и обозначена буквой «А». Максимальный диапазон значений предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24...24,9$  МПа достигается при диапазоне значений расстояния  $c=4...8,2$  мм.

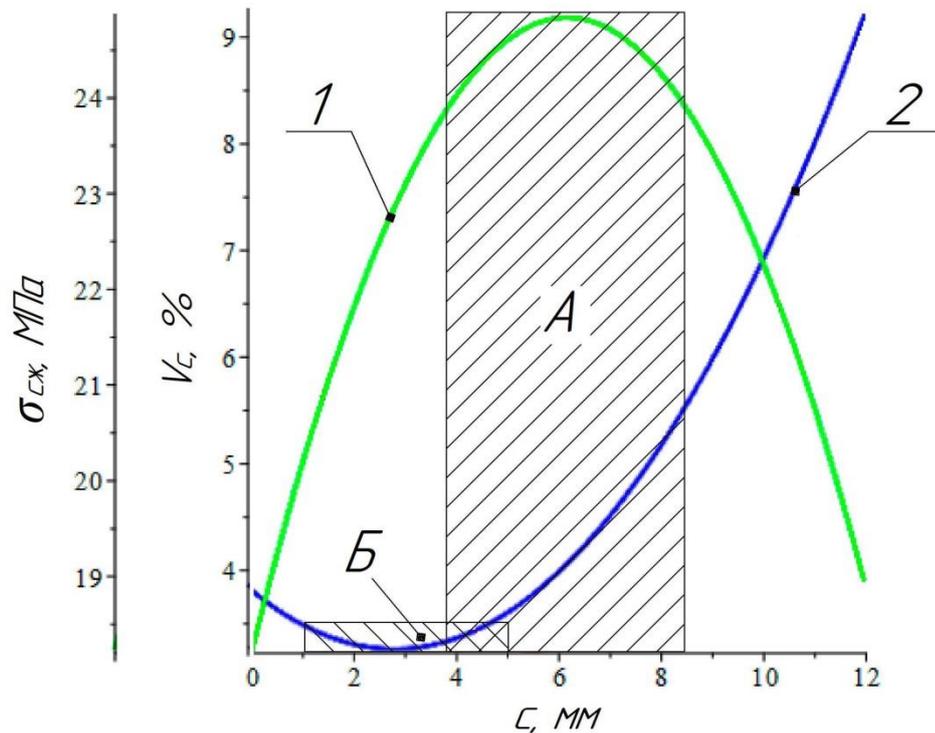


Рисунок 4.6. Графики зависимости функций отклика от расстояния между лопастью и стержневыми элементами  $c$ :

1 – предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ ; 2 – коэффициента неоднородности  $V_c$

Зона рациональных значений расстояния между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти для достижения минимального коэффициента неоднородности заштрихована и обозначена буквой «Б». Минимальный диапазон значений коэффициента неоднородности сухой смеси  $V_c=3,2...3,5$  % достигается при диапазоне значений  $c=1...5$  мм.

#### 4.3 Экспериментальное определение концентрации ключевого компонента

Для определения изменения концентрации ключевого компонента проводился двухфакторный эксперимент согласно ЦКРП  $2^2$ . В качестве варьируемых

факторов использовались время смешивания  $t$  и частота вращения лопастных валов  $n$ . В таблице 4.3 указаны значения варьируемых факторов и уровни их варьирования.

Таблица 4.3 – Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Факторы	Обозначение	Ед. измерения	Уровни варьирования					Интервал варьирования
			-1,41	-1	0	+1	+1,41	
Частота вращения валов, $n$	$X_4$	$c^{-1}$	0,65	0,75	1	1,25	1,35	0,25
Время смешивания, $t$	$X_5$	$c$	6	10	20	30	34	10

Для подтверждения адекватности теоретического выражения 2.45 необходимо было соблюдать одинаковые условия загрузки исходных компонентов в рабочую камеру смесителя. С этой целью была изготовлена специальная перегородка (рисунок 4.7), которая разделяла камеру смешивания на три части. По краям загружался песок, а в центральной части располагался ключевой компонент смеси – цемент. Отбор проб, после завершения каждого опыта, происходил только в центральной части, где начальная концентрация ключевого компонента  $C_0$  равнялась единице.



Рисунок 4.7. Рабочая камера смесителя с перегородкой:  
1 – загруженный кварцевый песок; 2 – загруженный ключевой компонент (цемент);  
3 – перегородка

Отбиралось по 9 точечных проб общей массой около 450 граммов. Концентрация ключевого компонента в каждой пробе определялась ситовым методом, который подробно описан в главе 3.

Результаты эксперимента по определению концентрации ключевого компонента двухкомпонентной смеси в смесителе с установленными стержневыми элементами представлены в таблице 4.4.

Данные в таблице 4.4 были использованы для получения уравнения регрессии, которое адекватно описывает зависимость концентрации ключевого компонента от частоты вращения лопастных валов и времени смешивания. Уравнение в кодированном виде выглядит так:

$$C_3 = 0,247 - 0,0387 \cdot X_4 - 0,09 \cdot X_5 + 0,028 \cdot X_4 \cdot X_5 + 0,0167 \cdot X_4^2 + 0,0457 \cdot X_5^2 . \quad (4.11)$$

Таблица 4.4 – Результаты эксперимента по определению концентрации ключевого компонента в зависимости от варьируемых факторов

Номер опыта	ПЛАН		
	$n, c^{-1}$	$t, c$	$C_3$
1	0,75	10	0,465
2	1,25	10	0,327
3	0,75	30	0,229
4	1,25	30	0,203
5	1,35	20	0,215
6	0,65	20	0,318
7	1	34	0,205
8	1	6	0,531
9	1	20	0,242
10	1	20	0,236
11	1	20	0,250
12	1	20	0,231
13	1	20	0,233

Значение критерия Кохрена, согласно расчету, составило  $G_{Cp}=0,186$ , что меньше табличного значения  $G_C=0,684$ . Адекватность уравнения регрессии проверена по критерию Фишера, расчетное значение которого равно  $F_{C,p} = 5,63$ , что меньше табличного значения  $F_C = 6,59$ .

В натуральном виде уравнение регрессии принимает следующий вид:

$$C_3 = 1,256 - 0,913 \cdot n - 0,0385 \cdot t + 0,0112 \cdot n \cdot t + 0,267 \cdot n^2 + 0,000457 \cdot t^2 . \quad (4.12)$$

На рисунке 4.8 показаны графики изменения концентрации ключевого компонента в зависимости от времени смешивания при различных частотах вращения лопастных валов и при фиксированном угле установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha=30^\circ$ . Характер всех графиков – экспоненциальный. Начиная с 6-ой секунды процесса смешивания, происходит постепенное снижение концентрации ключевого компонента до значения, близкого к 0,2 долям единицы.

Согласно графику 1 максимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{э,max11}=0,574$  при частоте вращения  $n_1=0,75 \text{ с}^{-1}$  достигается при минимальном рассматриваемом времени смешивания  $t_{11}=6 \text{ с}$ . Минимальная концентрация  $C_{э,min11}=0,223$  достигается при  $t_{12}=34 \text{ с}$ .

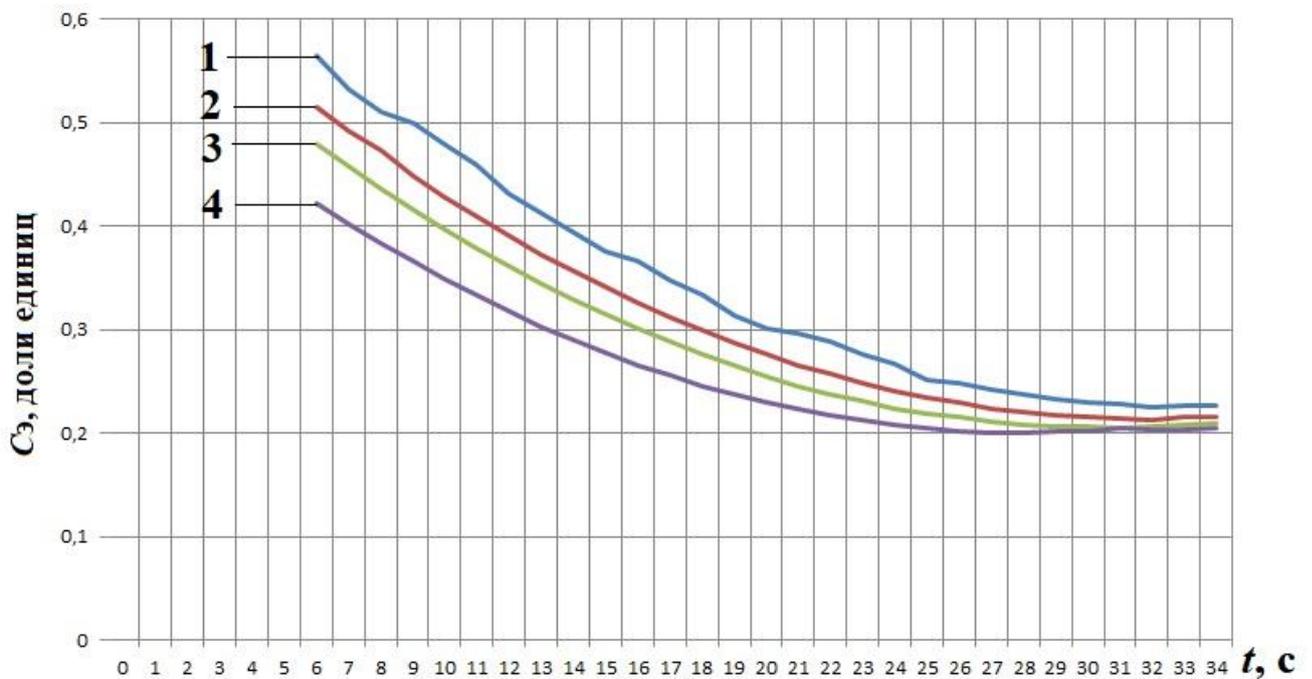


Рисунок 4.8. Зависимость концентрации ключевого компонента от времени смешивания при:  
 1 –  $n_1=0,75 \text{ с}^{-1}$ ; 2 –  $n_2=0,85 \text{ с}^{-1}$ ; 3 –  $n_3=0,95 \text{ с}^{-1}$ ; 4 –  $n_4=1,15 \text{ с}^{-1}$ ;

На графике 2, начиная с  $t_{21}=32 \text{ с}$ , стоит отметить небольшое увеличение значений концентрации ключевого компонента. Это можно объяснить тем, что в данных условиях, процесс смешивания достигает уравновешенного состояния, когда концентрация ключевого компонента достигает определенного значения и в последующие секунды принимает близкие к этому значению величины.

Максимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{э,max21}=0,536$  при частоте вращения  $n_2=0,85 \text{ с}^{-1}$  достигается при минимальном рассматриваемом

времени смешивания  $t_{21}=6$  с. Минимальная концентрация  $C_{э, \min 21}=0,218$  достигается при  $t_{22}=32$  с.

Зависимость концентрации ключевого компонента от времени смешивания при частоте вращения лопастных валов  $n_3=0,95$  с<sup>-1</sup> показана на графике 3. Максимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{э, \max 31}=0,486$  достигается при времени смешивания  $t_{31}=6$  с. Минимальная концентрация ключевого компонента  $C_{э, \min 31}=0,205$  достигается при  $t_{32}=30$  с.

Изменение концентрации ключевого компонента в зависимости от времени смешивания при частоте вращения лопастных валов  $n_4=1,15$  с<sup>-1</sup> показано на графике 4. Максимальное значение концентрации ключевого компонента  $C_{э, \max 41}=0,425$  при частоте вращения  $n_4=1,15$  с<sup>-1</sup> достигается при минимальном рассматриваемом времени смешивания  $t_{41}=6$  с. Минимальная концентрация  $C_{э, \min 41}=0,198$  достигается при  $t_{42}=28$  с.

Построенные графики по уравнению регрессии (4.12) показывают, что концентрация ключевого компонента уменьшается при повышении частоты вращения лопастных валов и увеличении времени смешивания. Достигнув определенного минимального значения, концентрация ключевого компонента, продолжает незначительно изменяться относительно этого значения.

#### **4.4 Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований в смесителе со стержневыми элементами**

Для подтверждения адекватности теоретических выражений по определению изменения концентрации ключевого компонента (формула (2.48)) и мощности, затрачиваемой приводом смесителя (формула (2.61)), представлены сравнения с соответствующими экспериментальными выражениями (4.13) и (4.8) соответственно.

#### 4.4.1 Проверка адекватности математических выражений, описывающих изменение концентрации ключевого компонента и времени смешивания

Для подтверждения адекватности математического выражения (2.48), описывающего изменение концентрации ключевого компонента  $C$ , и математического выражения (2.60), описывающего время смешивания  $t$ , необходимое для достижения двухкомпонентной сухой смеси заданной концентрации ключевого компонента, с использованием программного продукта «Maple» выполнено сравнение полученных с их использованием результатов с результатами расчета экспериментально полученного уравнения регрессии (4.12). На рисунке 4.9 приведены расчетные и экспериментальные графические зависимости, полученные с использованием выражений (2.48) и (4.12).

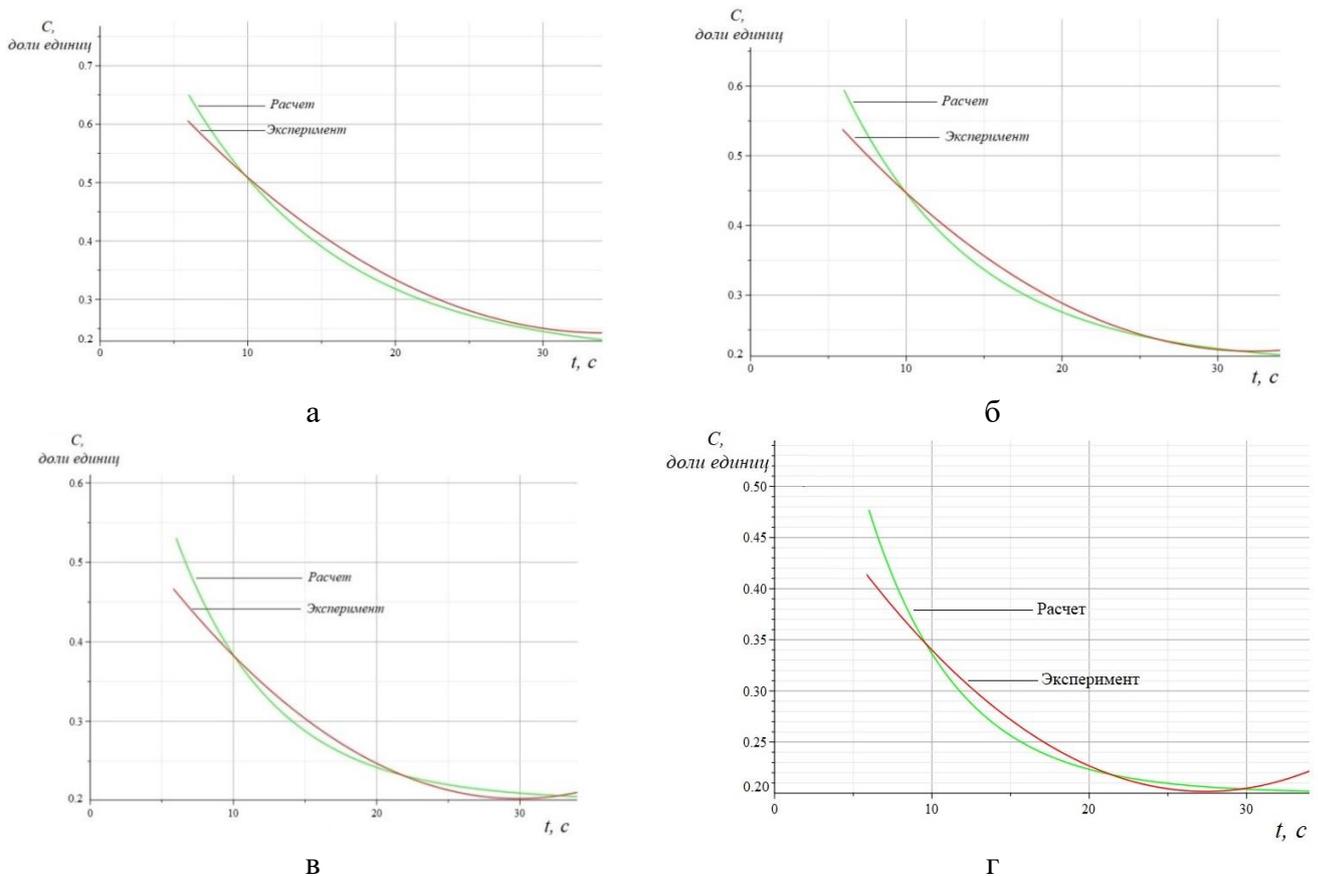


Рисунок 4.9. Графики изменения концентрации ключевого компонента смеси согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям при  $\alpha=30^\circ$  и:

а –  $n=0,65 \text{ c}^{-1}$ ; б –  $n=0,8 \text{ c}^{-1}$ ; в –  $n=1,0 \text{ c}^{-1}$ ; г –  $n=1,2 \text{ c}^{-1}$

На рисунке 4.9, а продемонстрированы зависимости концентрации ключевого компонента от времени смешивания, полученные по теоретическому выражению (2.48) и уравнению регрессии (4.12). Частота вращения лопастных валов при этом составляла  $n=0,65 \text{ с}^{-1}$ , а угол установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha=30^\circ$ . Наибольшая разница между концентрацией ключевого компонента  $C$  расчетным (0,65 долей единицы) и экспериментальным значением (0,61 долей единицы) составляет 6,15 %.

При повышении частоты вращения лопастных валов до  $n=0,8 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 4.9, б), наибольшее расхождение между теоретическим значением концентрации ключевого компонента (0,59 долей единицы) и значением (0,535 доли единицы), полученным в результате экспериментальных исследований, составляет 9,32 %.

При частоте вращения лопастных валов  $n=1,0 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 4.9, в), максимальное расхождение в процентах между теоретическим значением (0,531 доли единицы) и экспериментальным значением (0,469 долей единицы) составляет 11,68 %.

При максимальной частоте  $n=1,2 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 4.9, г), наибольшая разница между теоретическим значением концентрации ключевого компонента (0,475 долей единицы) и экспериментальным (0,414 долей единицы) составляет 12,84 %.

Так как наибольшее расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями концентрации ключевого компонента в двухвальном смесителе со стержневыми элементами составляет 12,84 %, это подтверждает адекватность предложенной математической модели.

В математическом выражении (2.60) время смешивания  $t$  является функцией, а в уравнении регрессии (4.12) время смешивания  $t$  является аргументом, поэтому совмещенное графическое представление функциональных зависимостей является некорректным. Воспользуемся сопоставлением результатов, полученных с использованием указанных выражений, приведенных в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Значения концентрации ключевого компонента и времени смешивания при  $\alpha=30^\circ$ ,  $n=1 \text{ с}^{-1}$ .

Результаты расчетов по математическому выражению (2.60)			Результаты расчетов $C$ по уравнению регрессии (4.12)		
№ п/п	Задаваемое значение конечной концентрации ключевого компонента, $C_k$ , доли единиц	Время смешивания, $t$ , с	№ п/п	Задаваемое значение времени смешивания, $t'$ , с	Концентрация ключевого компонента, $C$ , доли единиц
1	0,460	7,6	1'	6	0,460
2	0,421	8,7	2'	8	0,421
3	0,383	10,1	3'	10	0,383
4	0,348	11,4	4'	12	0,348
5	0,317	13,1	5'	14	0,317
6	0,290	14,9	6'	16	0,290
7	0,267	16,8	7'	18	0,267
8	0,247	19,2	8'	20	0,247
9	0,230	22,2	9'	22	0,230
10	0,218	25,7	10'	24	0,218
11	0,209	29,4	11'	26	0,209
12	0,204	32,1	12'	28	0,204
13	0,203	32,2	13'	30	0,203
14	0,207	30,5	14'	34	0,207

Согласно результатам, представленным в таблице 4.5, наибольшее расхождение между значениями времени смешивания, полученными по математическому выражению (2.60) и уравнению регрессии (4.12) соответствует порядковым номерам 12 и 12' со значениями  $t=32,1 \text{ с}$  и  $t'=28 \text{ с}$ , что составляет 12,77 %. Это позволяет сделать вывод об адекватном описании математическим выражением (2.60) времени, необходимого для достижения заданной концентрации ключевого компонента смеси.

#### 4.4.2 Проверка адекватности математического выражения, описывающего мощность, потребляемую приводом смесителя

Для подтверждения адекватности математического выражения (2.61), описывающего потребляемую приводом смесителя мощность  $P_{прив}$ , с применением программного продукта «Maple» выполнено сравнение полученных с его использованием результатов с результатами расчета уравнения регрессии (4.8), описывающего потребляемую приводом экспериментальной установки мощность

$P_{\text{прив.эксп}}$ . На рисунке 4.10 приведены расчетные и экспериментальные графические зависимости, полученные с использованием выражений (2.61) и (4.8), при различных значениях частоты вращения  $n$  валов и угла  $\alpha$  установки лопастей.

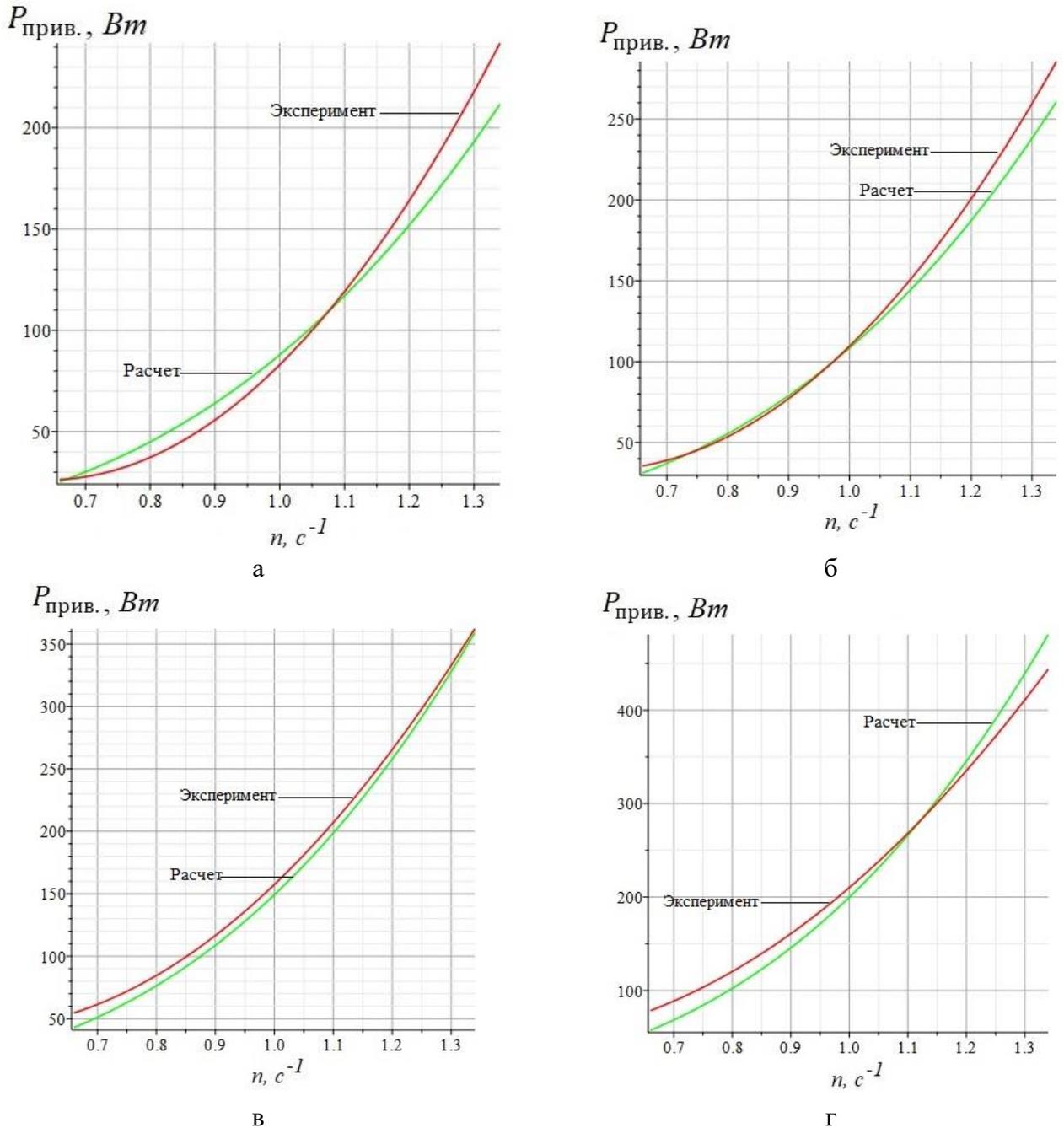


Рисунок 4.10. Графики, построенные по результатам расчетных и экспериментальных показателей потребляемой мощности привода двухвального смесителя с установленными стержневыми элементами в зависимости от частоты вращения валов  $n$  при:  
а –  $\alpha=25^\circ$ ; б –  $\alpha=30^\circ$ ; в –  $\alpha=35^\circ$ ; г –  $\alpha=40^\circ$

На рисунке 4.10, а, продемонстрированы теоретическая и экспериментальная зависимости мощности привода смесителя от частоты вращения при угле

установки лопасти  $\alpha=25^\circ$ . Наибольшая разница между расчетным значением  $P_{прив}=212$  Вт и экспериментальным значением  $P_{прив.эксп}=237$  Вт достигается при значении  $n=1,34$  с<sup>-1</sup> и составляет 10,55 %.

При  $\alpha=30^\circ$  (рисунок 4.10, б) наибольшее расхождение между расчетным значением  $P_{прив}=263$  Вт и экспериментальным  $P_{прив.эксп}=283$  Вт возникает при частоте вращения лопастных валов  $n=1,34$  с<sup>-1</sup>. В процентном соотношении расхождение составляет 7,07 %.

При  $\alpha=35^\circ$  (рисунок 4.10, в) наибольшее расхождение между расчетным значением  $P_{прив}=49$  Вт и экспериментальным значением  $P_{прив.эксп}=53$  Вт, что в процентном соотношении составляет 7,54 %, при частоте вращения лопастных валов  $n=1,2$  с<sup>-1</sup>.

При максимальном значении  $\alpha=40^\circ$  (рисунок 4.10, г) наибольшее расхождение между расчетным значением  $P_{прив}=480$  Вт и экспериментальным значением  $P_{прив.эксп}=440$  Вт в процентном соотношении составляет 8,33 % при частоте вращения лопастных валов  $n=1,34$  с<sup>-1</sup>.

Исходя из полученных приведенных результатов, различие между экспериментальными и расчетными значениями мощности привода в двухвальном смесителе со стержневыми элементами составляет 10,55 %, что подтверждает адекватность предложенной математической модели.

#### 4.5 Выводы по главе

1. Выбраны и обоснованы основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на функции отклика, характеризующие процесс смешивания в экспериментальной установке горизонтального лопастного смесителя периодического действия.

2. Для экспериментальной установки периодического действия двухвального смесителя со стержневыми элементами получены математические выражения, в виде уравнений регрессии, адекватно описывающие зависимости коэффициента

неоднородности  $V_c$  мелкозернистой цементно-песчаной смеси с содержанием ключевого компонента 20 %, 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.

3. С использованием полученных уравнений регрессии 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  $V_{c.min} = 2,63$  % 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 относительно плоскости вращения  $\alpha = 27^\circ$ ;

- максимальное значение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж} = 24,99$  МПа бетонных образцов, получаемых из приготовленной смеси, достигается при частоте вращения лопастных валов  $n = 0,97$  с<sup>-1</sup>, расстоянии  $c = 6,32$  мм и угле  $\alpha = 31,67^\circ$ ;

- общая мощность  $P_{прив.эксп}$ , потребляемая приводом смесителя, пропорциональна частоте вращения лопастных валов и углу установки лопасти. Максимальные значения мощности привода  $P_{прив.мах} = 425$  Вт достигаются при  $n = 1,34$  с<sup>-1</sup> и  $\alpha = 40^\circ$ . Изменение положения стержневых элементов относительно рабочих поверхностей лопастей оказывает существенное влияние на потребляемую мощность при низких частотах вращения лопастных валов. При  $n = 0,65$  с<sup>-1</sup> и  $c = 6$  мм мощность, потребляемая приводом на 30,36 % меньше, чем при минимальном и максимальном значении  $c$ . При максимальном значении  $n = 1,34$  с<sup>-1</sup> и аналогичном значении  $c = 6$  мм мощность  $P_{прив.эксп}$  понижается всего на 5,81 % по сравнению с аналогичными показателями при  $c = 0$  мм и  $c = 12$  мм, поэтому влияние установки стержневых элементов на  $P_{прив.эксп}$  при данных условия является несущественным.

4. Установлены рациональные параметры варьируемых факторов для максимальных значений предела прочности на сжатие и минимальных значений коэффициента неоднородности. Так максимальный диапазон значений предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж} = 22...24,99$  МПа достигается при диапазоне частоты

вращения  $n=0,8...1,15 \text{ с}^{-1}$ . Минимальный диапазон значений коэффициента неоднородности сухой смеси  $V_c=2,9...3,5 \%$  достигается при диапазоне частоты вращения  $n=1,15...1,34 \text{ с}^{-1}$ . Максимальный диапазон значений предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24,5...24,85 \text{ МПа}$  достигается при диапазоне значений угла установки лопасти  $\alpha=27...36^\circ$ . Минимальный диапазон значений коэффициента неоднородности сухой смеси  $V_c=3,5...4,0 \%$  достигается при диапазоне значений угла установки лопасти  $\alpha=22...29^\circ$ . Максимальный диапазон значений предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}=24...24,9 \text{ МПа}$  достигается при диапазоне значений расстояния  $c=4...8,2 \text{ мм}$ . Минимальный диапазон значений коэффициента неоднородности сухой смеси  $V_c=3,2...3,5 \%$  достигается при диапазоне значений  $c=1...5 \text{ мм}$ .

5. Для двухвального смесителя периодического действия со стержневыми элементами перед рабочими поверхностями лопастей получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость концентрации ключевого компонента  $C$  цементно-песчаной смеси от частоты вращения лопастных валов  $n$  и времени смешивания  $t$ . Исследовано влияние на изменение функции рассматриваемых параметров. Установлено, что величина  $C$  уменьшается при увеличении частоты вращения  $n$  и времени смешивания  $t$ . Установлено, что процесс смешивания можно считать завершившимся, когда значение концентрации ключевого компонента достигает величины, незначительно изменяющейся при его продолжении. Исследовано влияние на изменение функции рассматриваемых параметров.

6. 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 – 12,84%; потребляемой приводом смесителя мощности – 10,55 %; времени смешивания – 12,77 %.

## ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 5.1 Инженерная методика расчета конструктивных и технологических параметров смесителя

Инженерная методика расчета технологических и конструктивных параметров лопастного горизонтального смесителя включает в себя определение его основных конструктивных параметров, изменения концентрации ключевого компонента сухой смеси, времени смешивания, а также мощности, потребляемой приводом смесителя. Эти методика включается в себя разработанные аналитические выражения, приведенные в главе 2, и существующие методики, анализ которых приведен в главе 1.

Рассмотрим инженерную методику расчета на примере двухвального лопастного горизонтального смесителя периодического действия, перед лопастями которого устанавливаются стержневые элементы цилиндрического профиля. Исходя из производственной необходимости зададим производительность смесителя  $Q=15$  т/ч (4,2 кг/с). Коэффициент использования оборудования во времени  $K_B=0,85$ . В смесителе приготавливается мелкозернистая двухкомпонентная цементно-песчаная сухая смесь с соотношением цемента к песку 1:4 и плотностью  $\rho=1600$  кг/м<sup>3</sup>. Размер наибольших частиц компонентов смеси (кварцевый песок) не более 0,8 мм.

Из выражения (1.13) найдем геометрический объем рабочей камеры смесителя. Время цикла смешивания  $t_{ц}$  предварительно примем равным 150 с. В последующих действиях время цикла смешивания будет уточнено.

$$V = \frac{Q \cdot t_{ц} \cdot K_K}{\rho \cdot K_H \cdot K_B} \quad (5.1)$$

$$V = \frac{4,2 \cdot 150 \cdot 1,12}{1600 \cdot 1 \cdot 0,85} = 0,52 \text{ м}^3.$$

Примем объем рабочей камеры смесителя  $V=0,5$  м<sup>3</sup>.

Определим радиус днища корпуса смесителя с помощью выражения (1.16):

$$R_K = \sqrt[3]{\frac{Q \cdot t_{ц} \cdot K_K}{709 \cdot \rho \cdot K_H \cdot K_B}} \quad (5.2)$$

$$R_K = \sqrt[3]{\frac{15 \cdot 2,5 \cdot 1,12}{709 \cdot 1,6 \cdot 1 \cdot 0,85}} = 0,352 \text{ м.}$$

Принимаем радиус днища корпуса равный  $R_K=0,35$  м.

Площадь сечения рабочей камеры смесителя находим по формуле (1.15):

$$F = 2,86 \cdot R_K^2 \quad (5.3)$$

$$F = 2,86 \cdot 0,35^2 = 0,35 \text{ м}^2.$$

Длину рабочей камеры  $L$  смесителя определяем по следующей формуле (1.21):

$$L = \frac{V}{F} \quad (5.4)$$

$$L = \frac{0,5}{0,35} = 1,43 \text{ м.}$$

Принимаем длину рабочей камеры смесителя  $L=1,5$  м.

Расстояние  $B_1$  между валами смесителя также зависит от радиуса днища корпуса (1.18):

$$B_1 = 1,4 \cdot R_K \quad (5.5)$$

$$B_1 = 1,4 \cdot 0,35 = 0,49 \text{ м.}$$

Высота корпуса смесителя находится по формуле (1.19):

$$H = (2,2 \dots 2,4) \cdot R_K \quad (5.6)$$

$$H = (2,2 \dots 2,4) \cdot 0,35 = 0,77 \dots 0,84 \text{ м.}$$

Принимаем высоту корпуса смесителя  $H=0,8$  м.

Ширина корпуса смесителя выбирается из соотношения (1.20):

$$B = 3,4 \cdot R_K \quad (5.7)$$

$$B = 3,4 \cdot 0,35 = 1,19 \text{ м.}$$

Принимаем ширину корпуса смесителя  $B=1,2$  м.

Наружный радиус вращения лопасти  $R_{л.н.}$  (м), определяется по известной формуле (1.17):

$$R_{л.н.} = R_K - 0,005 \quad (5.8)$$

$$R_{л.н.} = 0,35 - 0,005 = 0,345 \text{ м.}$$

На рисунке 5.1 представлена схема к расчету основных конструктивных параметров двухвального лопастного смесителя.

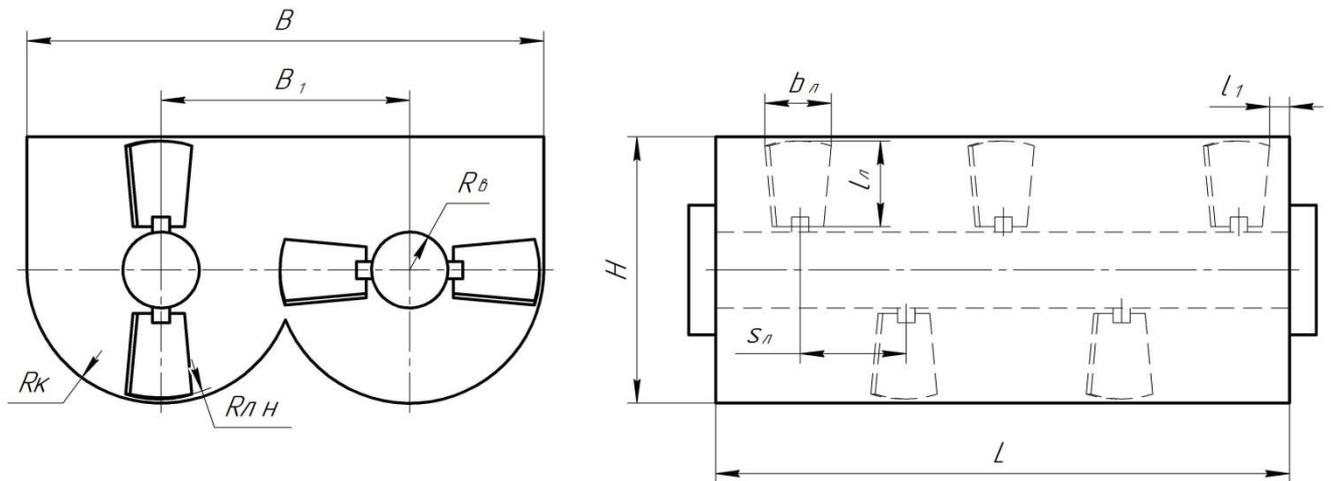


Рисунок 5.1. Схема к расчету основных конструктивных параметров двухвального смесителя

Предварительно примем радиус лопастных валов  $R_b=0,05$  м.

Ширина лопасти определяется по следующему выражению (1.22):

$$b_l = 0,42 \cdot R_{л.н.} \quad (5.9)$$

$$b_l = 0,42 \cdot 0,345 = 0,145 \text{ м.}$$

Высота лопасти высчитывается по формуле (1.23):

$$L_l = 0,5 \cdot R_{л.н.} \quad (5.10)$$

$$L_l = 0,5 \cdot 0,345 = 0,173 \text{ м.}$$

Шаг установки лопастей определяется из соотношения (1.24):

$$s_l = 0,75 \cdot R_{л.н.} \quad (5.11)$$

$$s_l = 0,75 \cdot 0,345 = 0,26 \text{ м.}$$

Расстояние  $l_1$  от торца рабочей камеры смесителя до крайних лопастей при максимальном угле установке лопасти  $\alpha=40^\circ$  определяется по формуле (1.26):

$$l_1 = (0,5 \cdot b_l \cdot \sin \alpha) + 0,01. \quad (5.12)$$

$$l_1 = (0,5 \cdot 0,145 \cdot \sin 40^\circ) + 0,01 = 0,06 \text{ м.}$$

Определим количество лопастей смесителя с помощью выражения (1.27):

$$i = 4 \cdot \left( \frac{(L-2 \cdot l_1)}{s_l} + 1 \right). \quad (5.13)$$

$$i = 4 \cdot \left( \frac{(1,5-2 \cdot 0,06)}{0,22} + 1 \right) = 30 \text{ шт.}$$

Диапазон частот вращения лопастных валов  $n$  определяется по формуле (1.25) [97]:

$$n = \frac{0,47 \dots 0,75}{\sqrt{2 \cdot R_{\text{л.н.}}}} \quad (5.14)$$

$$n = \frac{0,47 \dots 0,75}{\sqrt{0,69}} = 0,83 \dots 0,91 \text{ с}^{-1}.$$

Выбираем исследуемый диапазон частоты вращения лопастных валов  $n=0,8 \dots 1,0 \text{ с}^{-1}$ . Угол установки лопасти выбирается в соответствии с рекомендациями [100] в зависимости от угла внутреннего трения смешиваемых компонентов. В данном случае рассмотрим диапазон изменения угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha=20^\circ \dots 40^\circ$ .

Для предложенной новой конструкции двухвального смесителя определим радиус  $R_{\text{ц}}$  и высоту  $h$  устанавливаемых стержневых элементов цилиндрического профиля перед рабочей поверхностью лопасти. Установим взаимосвязь размеров стержневых элементов с конструктивными и технологическими параметрами смесителя. Для этого воспользуемся полученным аналитическим выражением (2.48).

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

$$\times J_0 \left( \frac{R_{\text{в}}}{R_k} \cdot \psi_1 \right) \times J_0 \left( \frac{r}{R_k} \cdot \psi_1 \right). \quad (5.15)$$

С помощью программного продукта, например, «*Maple*», произведены расчёты изменения концентрации ключевого компонента при смешивании сухих компонентов в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами. Полученные результаты внесены в таблицу 5.1.

Приведенные расчетные данные в таблице 5.1 показывают, что концентрация ключевого компонента принимает значения приближенные к  $C=0,215$  при высоте стержневых элементов  $h=0,15$  м и частоте вращения лопастных валов  $n = 1 \text{ с}^{-1}$ .

Таблица 5.1 - Зависимость концентрации ключевого компонента от частоты вращения лопастных валов  $n$  и высоты  $h$  устанавливаемых стержневых элементов

Высота стержневых элементов $h$ , м	Частота вращения лопастных валов, $n$ , с <sup>-1</sup>				
	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
0	0,245	0,239	0,235	0,231	0,228
0,05	0,237	0,232	0,229	0,226	0,224
0,1	0,231	0,227	0,225	0,223	0,221
0,125	0,229	0,225	0,223	0,221	0,220
0,15	0,227	0,224	0,222	0,220	0,219

Время смешивания  $t$  является наиболее важным технологическим параметром, характеризующим процесс смешивания в смесителях периодического действия. При достижении заданной концентрации ключевого компонента смеси за минимально возможный промежуток времени сокращается время цикла смесеобразования  $t_{ц}$ , а также обеспечивается снижение энергоемкости процесса.

Время смешивания является одним из слагаемых времени цикла перемешивания. Определим [79, 105] методике и формуле (1.3):

$$t_{ц} = t_3 + t + t_в. \quad (5.16)$$

Принимаем, согласно [79, 105],  $t_3=60$  с и  $t_в=60$  с.

Для расчета времени смешивания используем полученное аналитическое выражение (2.60):

$$t = \frac{\ln\left(\frac{(1-q)J_0\left(\frac{r}{R_k}\psi_1\right)}{q \cdot (\alpha_0 - 1) J_0\left(\frac{R_B}{R_k}\psi_1\right)}\right)}{x \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}. \quad (5.17)$$

В таблице 5.2 показана зависимость времени смешивания  $t$ , необходимого для достижения заданной концентрации ключевого компонента  $C_k=0,215$ , от радиуса установленных стержневых элементов  $R_y$  и угла установки лопасти  $\alpha$  относительно плоскости вращения.

Таблица 5.2 – Зависимость времени смешивания  $t$ , компонентов при изменении радиуса  $R_{\text{ш}}$  и угла  $\alpha$

Угол установки лопасти, $\alpha$ , град	Радиус установленных стержневых элементов, $R_{\text{ш}}$ , м				
	0	0,002	0,003	0,004	0,005
20	112	93	86	80	75
25	73	63	59	56	52
30	52	46	44	41	39
35	40	36	34	32	31
40	32	29	27	26	25

Анализ полученных результатов в таблице 5.2 показывает, что наименьшие значения времени смешивания  $t$  достигается при радиусе установленных стержневых элементов  $R_{\text{ш}}=0,005$  м, и значении угла установки лопасти относительно плоскости вращения  $\alpha=40^\circ$ .

Как видно из результатов расчета в таблицах 5.1 и 5.2 увеличение геометрических размеров стержневых элементов положительно влияет на повышение однородности смешивания, а также уменьшения времени для достижения заданной концентрации ключевого компонента. Однако, безгранично увеличить радиус и высоту установленных стержневых элементов нерационально. Во-первых, радиус  $R_{\text{ш}}$  зависит от размеров лопасти, т.е. невозможно установить стержневые элементы с суммой радиусов больше, чем ширина лопасти. Во-вторых, лопасть из-за своей формы вносит большой эффект в процесс конвективного смешивания за счет захвата, переноса и вдавливания друг в друга смешиваемых компонентов. Стержневые элементы цилиндрического профиля не подходят для транспортировки смешиваемых материалов, а их функция заключается исключительно в воздействии на уплотнение материала перед рабочей поверхностью лопасти, деформируя его и повышая интенсификацию в указанном микрообъеме.

Учитывая ширину лопасти  $b_{\text{л}}=0,145$  м и её высоту  $L_{\text{л}}=0,173$  м, выбираем высоту установленных стержневых элементов  $h=0,15$  м и их радиус  $R_{\text{ш}}=0,005$  м. При выбранных геометрических параметрах стержневых элементов, а также при  $\alpha=35^\circ$  и  $n=1$  с<sup>-1</sup> время смешивания составляет  $t=31$  с, а концентрация ключевого компонента  $C=0,219$ .

Время цикла смешивания с учетом найденного времени смешивания составляет:

$$t_{\text{ц}} = 60 + 31 + 60 = 151 \text{ с.}$$

Если полученное время цикла смешивания сильно отличается от принятого предварительного значения, то производительность следует пересчитать по формуле (1.13):

$$Q = \frac{V \cdot \rho \cdot K_{\text{H}} \cdot K_{\text{B}}}{t_{\text{ц}} \cdot K_{\text{к}}}. \quad (5.18)$$

В данном случае перерасчет производительности не требуется, так как полученное значение времени цикла смешивания незначительно отличается от принятого ранее.

При разработке новой конструкции смесителя необходимо учитывать рациональное энергопотребление установки. Общая мощность, затрачиваемая на процесс смешивания в лопастном горизонтальном смесителе, определяется с помощью выражения (2.99):

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{л.с.}} + P_2 + P_3 + P_4. \quad (5.19)$$

Для определения каждой из составляющих общей мощности, затрачиваемой на процесс смешивания, были выбраны конструктивные и технологические параметры смесителя с установленными перед лопастью стержневыми элементами, которые получены в результате проведенных расчетов:

- угол установки лопасти  $\alpha=35^\circ$ ;
- частота вращения лопастных валов  $n=1 \text{ с}^{-1}$ ;
- радиус установленных стержневых элементов,  $R_{\text{ст}}=0,005 \text{ м}$ .

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил лобового сопротивления, согласно полученной формуле (2.95), будет равна:

$$\begin{aligned} P_{\text{л.с.}} = & i \cdot \left( \frac{c_0}{4 \cdot L_{\text{л}}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \tilde{b}^2 \cdot ((r_0 + L_{\text{л}})^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{\tilde{b}}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \times \right. \\ & \times \left( 1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{\tilde{b}}\right) \right) \Big) + z \cdot \left( \frac{c_1}{4 \cdot L_{\text{л}}} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_0^2 \cdot ((r_0 + L_{\text{л}})^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{d_0}\right) \times \right. \\ & \times \left. (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{л}} - r_0}{d_0}\right) \right) \right). \quad (5.20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{л.с.} = & 30 \cdot \left( \frac{1,16}{4 \cdot 0,173} \cdot 1600 \cdot 6,28^3 \cdot 0,083^2 \cdot ((0,125 + 0,173)^4 - 0,125^4) \times \right. \\
& \times \exp\left(\frac{0,125}{0,083}\right) \cdot \left( \exp\left(6,28 \cdot \frac{3,14}{5,65}\right) - 1 \right) \times \\
& \times \left( 1 - \exp\left(-\frac{0,173 - 0,125}{0,083}\right) \right) \left. \right) + 60 \cdot \left( \frac{0,34}{4 \cdot 0,148} \cdot 1600 \cdot 6,28^3 \cdot 0,01^2 \times \right. \\
& \times ((0,097 + 0,173)^4 - 0,125^4) \cdot \exp\left(\frac{0,125}{0,01}\right) \times \\
& \times \left( \exp\left(6,28 \cdot \frac{3,14}{5,65}\right) - 1 \right) \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{0,173 - 0,125}{0,01}\right) \right) \left. \right) = 3591 \text{ Вт.}
\end{aligned}$$

Мощность для преодоления силы трения смеси о поверхность лопастей находится по формуле (2.96):

$$\begin{aligned}
P_2 = & 0,67 \cdot \pi \cdot R_{ср.}^2 \cdot c_{ср.} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot (R_{л.н.}^3 - R_{л.внтр.}^3) \cdot i \cdot \psi_d \cdot k_3 \cdot f. \quad (5.21) \\
P_2 = & 0,67 \cdot 3,14 \cdot 0,26^2 \cdot 3 \cdot 1600 \cdot 6,28^3 \cdot \operatorname{tg} 35^2 \cdot (0,345^3 - 0,172^3) \cdot 30 \times \\
& \times 0,081 \cdot 0,65 = 3886 \text{ Вт.}
\end{aligned}$$

Мощность для преодоления сопротивления бетонной смеси по поверхности корпуса определяется по формуле (2.97):

$$\begin{aligned}
P_3 = & 0,4 \cdot \pi \cdot c_{ср.} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot (R_{к.}^5 - R_{л.н.}^5) \cdot i \cdot \psi_d \cdot k_3. \quad (5.22) \\
P_3 = & 0,4 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 1600 \cdot 6,28^3 \cdot \operatorname{tg} 35^2 \cdot (0,35^5 - 0,345^5) \cdot 30 \cdot 0,08 \cdot 1 = \\
& = 7162 \text{ Вт.}
\end{aligned}$$

Мощность для преодоления сопротивления бетонной смеси вращению кронштейнов высчитывается по формуле (2.98):

$$\begin{aligned}
P_4 = & 0,25 \cdot c_{ср.} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_{к.} \cdot (R_{н.кр.}^4 - R_{в.кр.}^4) \cdot i \cdot k_3. \quad (5.23) \\
P_4 = & 0,25 \cdot 3 \cdot 1600 \cdot 6,28^3 \cdot 0,012 \cdot (0,172^4 - 0,05^4) \cdot 30 \cdot 1 = 100 \text{ Вт.}
\end{aligned}$$

Общую мощность, затрачиваемую на процесс смешивания, определим по формуле (5.18):

$$P_{общ} = 3591 + 3886 + 7162 + 100 = 14739 \text{ Вт.}$$

Рассчитаем полную мощность привода смесителя по формуле (2.61):

$$\begin{aligned}
P_{прив} = & \frac{\lambda \cdot (P_{общ1})}{\eta}. \quad (5.24) \\
P_{прив} = & \frac{1,1 \cdot 14739}{0,95} = 17\,066 \text{ Вт.}
\end{aligned}$$

В таблице 5.3 показана зависимость мощности привода  $P_{прив}$ , в зависимости от частоты вращения лопастных валов  $n$  и угла установки лопастей  $\alpha$ , при выбранных геометрических параметрах установленных цилиндрических стержневых элементов. Коэффициент дополнительных энергетических затрат принимаем  $\lambda=1,1$ , а КПД привода смесителя примем равным  $\eta=0,95$ .

Таблица 5.3 - Зависимость потребляемой приводом смесителя мощности  $P_{прив}$  (Вт) при изменении частоты вращения лопастных валов и угла установки лопастей

Угол установки лопастей $\alpha$ , град.	Частота вращения лопастных валов, $n$ , $c^{-1}$				
	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
20	1945	2334	2769	3257	3799
25	3331	3996	4744	5579	6507
30	5745	6892	8181	9622	11222
35	8470	10160	12061	14184	17066
40	11570	13879	16475	19376	22599

Как видно из результатов расчета, повышение частоты вращения лопастных валов и угла установки лопасти приводит к существенному повышению мощности, потребляемой приводом. Примем мощность привода смесителя  $P_{прив} = 18$  кВт.

По общепринятым инженерным методикам расчета [43] подтвердим выполнение условий прочности и жесткости лопастных валов и других элементов конструкции смесителя, исходя из полученных частоты вращения лопастных валов и мощности привода. По результатам расчета (расчет не приводится)  $R_g=0,05$  м удовлетворяет этим условиям.

Все расчетные данные отображены в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Техническая характеристика смесителя объемом  $V=0,5$  м<sup>3</sup> с установленными стержневыми элементами

Параметр	Значение
Объем, $V$ , м <sup>3</sup>	0,5
Производительность, $Q$ , кг/с	4,2...4,4
Время цикла смешивания, $t_{ц}$ , с	151
Радиус установленных стержневых элементов, $R_{ц}$ , м	0,005
Высота установленных стержневых элементов, $h$ , м	0,15
Размеры лопасти, $L_l \times b_l$ , м	0,173×0,145
Длина, ширина и высота корпуса смесителя, $L \times B \times H$ , м	4×1×0,7
Частота вращения лопастных валов, $n$ , $c^{-1}$	1
Угол установки лопасти относительно плоскости вращения, $\alpha$ , град	35
Мощность, потребляемая приводом, $P_{прив}$ , Вт	18 000

Расчет параметров двухвального лопастного смесителя, с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля, целесообразно выполнять с использованием следующего алгоритма, показанного на рисунке 5.2.

*АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДВУХВАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЯ  
СО СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ*

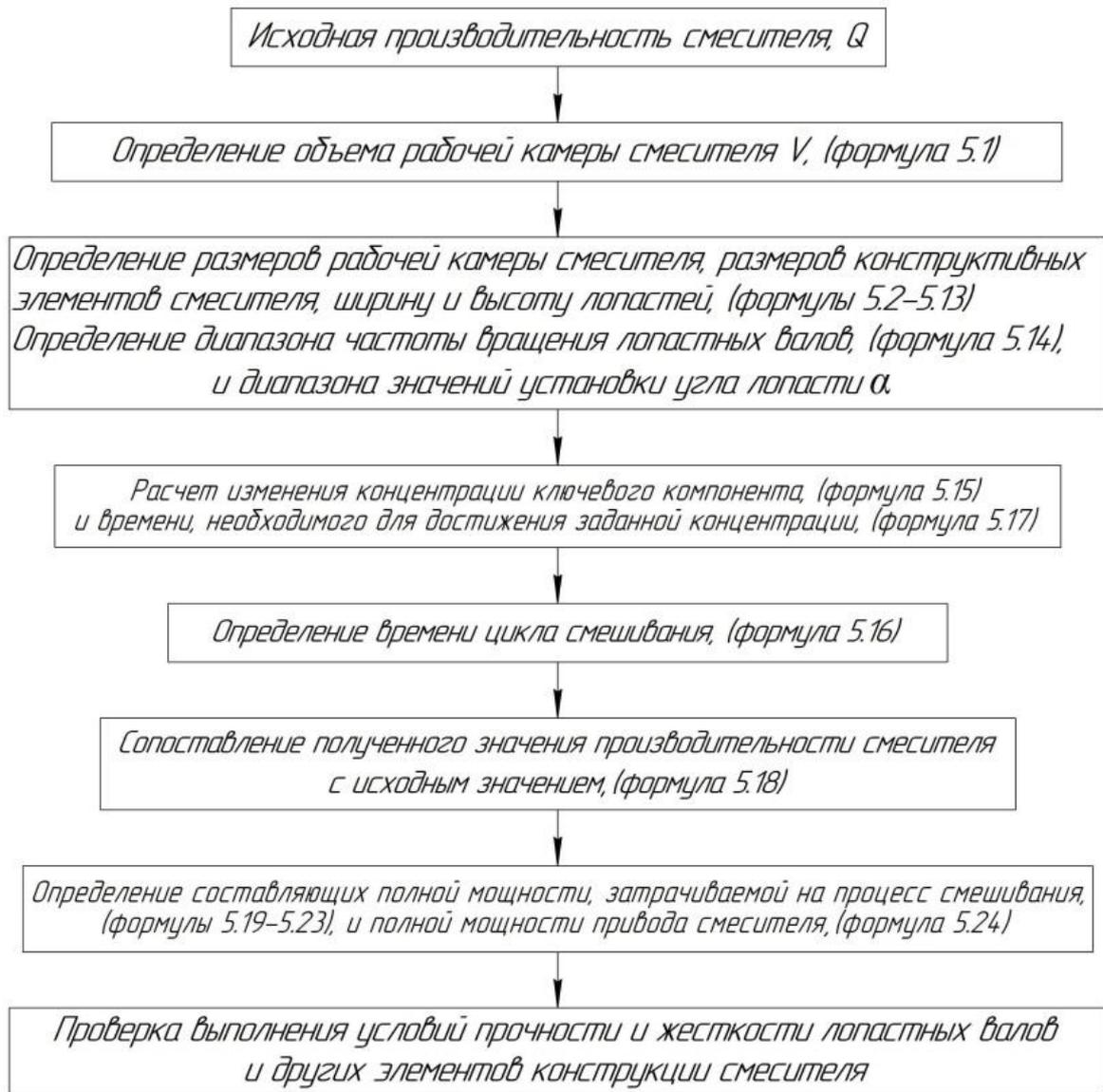


Рисунок 5.2. Алгоритм расчета основных конструктивно-технологических параметров лопастного смесителя с установленными перед лопастями стержневыми элементами

Данный алгоритм может быть использован для расчета при проектировании лопастных горизонтальных смесителей с установленными стержневыми элементами цилиндрического профиля.

## 5.2 Внедрение результатов исследований

Промышленное внедрение технического решения в виде установки стержневых элементов цилиндрического профиля было реализовано на предприятии ООО «Экохим-Инкапол», расположенного в г. Шебекино Белгородской области. Компания ООО «Экохим-Инкапол» занимается производством строительных материалов и лакокрасочной продукции. Среди широкого выбора ассортимента продукции и услуг компании следует выделить производство сухих смесей для выравнивания полов с последующим созданием эпоксидных покрытий для пола.

На предприятии производят следующие классы напольных смесей, исходя из значений прочности на сжатие: В10, В12,5, В15 по ГОСТ 31358–2019 для умеренных нагрузок, применяемых к напольному покрытию. Подготовка напольной смеси осуществляется в горизонтальном лопастном смесителе СГО-4. Техническая характеристика смесителя СГО-4 до и после внедрения технического решения представлена в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Техническая характеристика лопастного смесителя СГО-4

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя
Объем рабочей камеры смесителя	$V$	$\text{м}^3$	$6,4 \times 10^{-2}$
Коэффициент заполнения рабочей камеры смесителя	$k_z$	-	0,8
Частота вращения лопастного вала	$n$	$\text{с}^{-1}$	0,9...1,5
Установленная мощность электродвигателя	$N_{\text{прив}}$	кВт	1,8
Масса загружаемых материалов	$m_m$	кг	80
Время цикла смешивания в смесителе: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$t_{ц1}$ $t_{ц2}$ $t_{ц3}$	с	180
Часовая производительность смесителя: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$Q_{\text{ч}}$	кг/ч	1760

С целью установления эффективности применения стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей проведены производственные испытания. Для каждого вида испытания отбор проб и их анализ проводились лабораторией предприятия в течение трех смен через 2 часа.

Каждый из стержневых элементов выполнен из двух стержней цилиндрического профиля диаметром 0,008 м, расположенных перпендикулярно друг другу и неподвижно соединенных сваркой. Первый стержень имеет длину  $55 \times 10^{-3}$  м, а второй, предназначенный для крепления, с метрической резьбой по всей его длине, –  $40 \times 10^{-3}$  м. Лопасти смесителя выполнены в форме пластин, с криволинейными сторонами, ограниченными концентричными дугами с радиусами  $R_1 = 154 \times 10^{-3}$  м и  $R_2 = 219 \times 10^{-3}$  м, и расположенными по нормали к ним прямолинейными сторонами. Расстояние между прямолинейными сторонами в наиболее широкой части лопасти составляет  $65 \times 10^{-3}$  м. В лопастях, у наиболее приближенных к лопастному валу криволинейных сторон и ограничивающих их прямолинейных сторон, выполнены сквозные крепежные отверстия. Через эти отверстия резьбовыми соединениями к лопастям попарно и неподвижно прикреплены стержневые элементы со стороны поверхностей лопастей, взаимодействующих с перемешиваемым материалом. У стержневых элементов продольные оси стержней длиной  $55 \times 10^{-3}$  м параллельны рядом расположенным прямолинейным образующим соответствующих лопастей.

В предложенной модели смесителя приготавливалась напольная цементно-песчаная смесь классом прочности В12,5 по ГОСТ 31358–2019 в двух вариантах соотношения компонентов. В качестве сырьевых компонентов использовался кварцевый песок по ГОСТ 8736–2014 крупностью от 0,3 до 1,0 мм и цемент марки ПЦ500-Д0 по ГОСТ 10178–85.

По первому варианту состава смеси содержание песка составляло 80 %, цемента – 20 %. Смесь соответствовала СП 82-101-98 и рецептуре, применяемой на предприятии.

По второму варианту состава смеси содержание песка составляло 82 %, цемента – 18 %. Рецептура подбиралась при производственных испытаниях.

Коэффициент неоднородности определялся ситовым методом.

Испытания по определению прочности на сжатие проводились при температуре  $(20 \pm 2)$  °С и относительной влажности воздуха  $(60 \pm 10)$  % в соответствии с ГОСТ Р 58277–2018.

В период опытно-промышленных испытаний контролировались следующие технологические параметры: коэффициент неоднородности готовой смеси,  $V_c$ , предел прочности бетонных образцов на сжатие, полученных из приготовленной сухой смеси,  $\sigma_{сж}$ , МПа (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Характеристика смесей, приготовленных в горизонтальном лопастном смесителе СГО-4

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя
Коэффициент неоднородности смеси, приготовленной в смесителе: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$V_{c1}$	%	4,85...5,01
	$V_{c2}$		4,25...4,38
	$V_{c3}$		4,53...4,67
Предел прочности на сжатие бетонных образцов, полученных из смеси, приготовленной в смесителе: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$\sigma_{сж1}$	МПа	17,94...18,48
	$\sigma_{сж2}$		19,97...20,57
	$\sigma_{сж3}$		18,39...18,79

Приготовление в смесителе цементно-песчаных смесей с содержанием цемента 20 % при использовании стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей позволило обеспечить снижение коэффициента неоднородности до 9,7 % и повышение предела прочности на сжатие бетонных образцов, изготовленных из полученной сухой смеси до 8,1 %. Качество смесей соответствовало ГОСТ 31358–2019.

Приготовление в смесителе цементно-песчаной смеси с пониженным содержанием цемента 18 % при использовании стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей обеспечило требуемое ГОСТ 31358-2019 ее каче-

ство: значения коэффициента неоднородности в диапазоне  $V_{c3}=4,53\dots4,67$  %, предела прочности на сжатие приготовленных из смеси бетонных образцов -  $\sigma_{сж3}=18,39\dots18,79$  МПа. Применение в смесителе стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей при приготовлении смеси указанного состава позволяет уменьшить потребность в цементе до 9,8 %.

В результате проведения производственных испытаний конструкции лопастного смесителя с установленными стержневыми элементами перед рабочими поверхностями лопастей рекомендовано его использование на ООО «Экохим-Инкапол» для получения качественных сухих строительных смесей. Полученные результаты подтверждены Актом внедрения стержневых элементов цилиндрического профиля на лопастном горизонтальном смесителе периодического действия СГО-4 и его производственном испытании на предприятии ООО «Экохим-Инкапол», г. Шебекино (Приложение 2).

Экономическая целесообразность и эффективность внедрения стержневых элементов цилиндрического профиля на лопастном горизонтальном смесителе периодического действия СГО-4 подтверждена и представлена в Приложении 4.

Результаты диссертационной работы используются в БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке студентов по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» – профиль программы «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов» и направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» – профиль программы «Разработка технологического оборудования и комплексов предприятий строительной индустрии» (Приложение 3).

### 5.3 Выводы по главе

1. Разработана методика инженерных расчетов основных конструктивных и технологических параметров горизонтального лопастного смесителя с установленными стержневыми элементами.

2. 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, относительно массы цемента по рецептуре предприятия, на 9,8 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ оборудования для смешивания сухих строительных 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 повышение 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 типоразмера 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  $C_{\min}^c=0,206$  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 концентрации 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 описывающие 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 9,35 %.

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  $V_{c.min} = 2,63 \%$  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  $\sigma_{сж}=24,99 \text{ МПа}$  бетонных образцов, получаемых из приготовленной смеси, достигается при частоте вращения лопастных валов  $n=0,97 \text{ с}^{-1}$ , расстоянии  $c=6,32 \text{ мм}$  и угле  $\alpha=31,67^\circ$ ;

- общая мощность  $P_{прив.эксп}$ , потребляемая приводом смесителя, пропорциональна частоте вращения лопастных валов и углу установки лопасти. Максималь-

ные значения мощности привода  $P_{прив.мах}=425$  Вт достигаются при  $n=1,34$  с<sup>-1</sup> 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 – 12,84%; потребляемой приводом смесителя мощности – 10,55 %; времени смешивания – 12,77 %.

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 кафедры «Механическое оборудование» 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.

### Список сокращений и условных обозначений

ССС – сухие строительные смеси.

$\Delta$  – шаг варьирования.

$\alpha$  – угол установки лопасти относительно плоскости вращения, град или рад.

$\alpha_0$  – отношение концентрации  $C_N$  к конечному идеальному значению  $C_K$ .

$a_1, a_2 \dots a_n$  – коэффициенты при линейной зависимости.

$a_{12}, a_{23} \dots a_{(n-1),n}$  – коэффициенты при парном взаимодействии факторов.

$a_n$  – коэффициент, расположенный при факторах варьирования.

$\beta$  – обозначение для сокращения записи выражения, м.

$\gamma$  – постоянная величина.

$\xi$  – числовой нормированный коэффициент.

$\xi_0$  – безразмерный параметр.

$\xi_1$  – безразмерный параметр.

$\eta$  – общий КПД привода.

$\lambda$  – коэффициент, учитывающий дополнительные энергетические потери,  
 $\lambda=1,1\dots1,3$ .

$\rho$  – насыпная плотность материала,  $\text{кг/м}^3$ .

$\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности на сжатие, Па.

$\varphi$  – угол поворота лопасти в смешиваемом материала, град или рад.

$\varphi_0$  – начальное значение угла входа лопасти в сыпучий материал, град или рад.

$\varphi_k$  – значение угла выхода лопасти из сыпучего материала, град или рад.

$\Delta\varphi$  – разница между углом входа лопасти в смешиваемый материал и выхода из него, град или рад.

$\psi_1$  – первый корень функции Бесселя,  $\psi_1=2,4048$ .

$\psi_d$  – коэффициент, зависящий от длины дуги рабочей поверхности лопасти.

$\Omega_V$  – коэффициент вариации в процентном отношении, %.

$\omega$  – угловая частота вращения, рад/с.

$A$  – работа, совершаемая лопастью для преодоления сил лобового сопротивления, Дж.

$a_0$  – нулевое значение коэффициента уравнения регрессии.

$a_1, a_2$  – произвольные постоянные.

$B$  – ширина корпуса смесителя, м.

$B_1$  – межосевое расстояние между горизонтальными валами смесителя, м.

$\tilde{b}$  – обозначение для сокращения записи выражения, м.

$b_l$  – ширина лопасти, м.

$C$  – концентрация ключевого компонента.

$C_0$  – начальное значение концентрации ключевого компонента смеси сыпучего материала.

$C_1, C_2$  – независимые функции.

$C_{10}$  – постоянная интегрирования.

$C_k$  – конечное (идеальное) значение концентрации ключевого компонента смеси сыпучего материала.

$c_{cp}$  – коэффициент сопротивления, зависящий от состава и пластичности смеси ( $c_{cp} = 3...9$ ).

$C_3$  – концентрация ключевого компонента, полученная в результате экспериментальных исследований.

$C_{min}^c$  – минимальное значение концентрации ключевого компонента сухой смеси, полученное при рациональных значениях конструктивно-технологических параметров смесителя.

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

$c$  – расстояние между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти, м.

$c_0$  – коэффициент сопротивления движению лопасти в воздушной среде.

$c_1$  – коэффициент сопротивления цилиндрического стержня в воздушной среде.

$\bar{c}$  – среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всех  $n$  пробах смеси.

$c_i$  – концентрация ключевого компонента в  $i$ -ой пробе.

$c_s$  – коэффициент сопротивления движению лопасти в среде смешиваемого материала.

$c_{s1}, c_{s2}$  – независимые функции.

$\bar{D}_R$  – коэффициент, учитывающий поперечное перемешивание частиц материала,  $\frac{m^2}{c}$ .

$\bar{D}_{Rл}$  – коэффициент, учитывающий вклад лопасти в поперечное перемешивание,  $\frac{m^2}{c}$ .

$\bar{D}_{Rц}$  – коэффициент, учитывающий вклад в поперечное движение частиц материала двух стержневых элементов цилиндрического профиля,  $\frac{m^2}{c}$ .

$d_0$  – диаметр устанавливаемых стержневых элементов, м.

$d_k$  – диаметр кронштейна лопасти, м.

$d_{\text{комп.мах1}}, d_{\text{комп.мах2}}$  – максимальный диаметр компонента 1 и компонента 2 соответственно, м.

$d_{\text{комп}}$  – диаметр частиц в программной среде EDEM, м.

$F$  – площадь сечения рабочей камеры смесителя, м<sup>2</sup>.

$F_{Vc}, F_{\text{сжж}}, F_{P_{\text{прив.эксп.}}}, F_{Cp}$  – расчетные значения критерия Фишера при оценке адекватности уравнений регрессии при определении коэффициента неоднородности, предела прочности на сжатие, мощности привода и концентрации ключевого компонента соответственно.

$f$  – коэффициент трения материала о поверхность лопасти.

$G$  – значение критерия Кохрена, определенное по таблице в работе для доверительной вероятности  $P=0,95$ .

$G_p$  – расчетное значение критерия Кохрена.

$G_{Vc.p}, G_{\text{сжж.p}}, G_{P_{\text{прив.эксп.p}}}, G_{Cp}$  – расчетные значения критерия Кохрена по результатам оценки воспроизводимости параллельных опытов при определении коэффициента неоднородности, предела прочности на сжатие, мощности привода и концентрации ключевого компонента соответственно.

$g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>.

$H$  – высота корпуса смесителя, м.

$h$  – высота стержневых элементов цилиндрической формы, м.

$i$  – количество лопастей смесителя, шт.

$J_0(z)$  – функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

$K_H$  – коэффициент заполнения рабочей камеры смесителя.

$K_B$  – коэффициент использования рабочего времени.

$K_K$  – коэффициент, учитывающий объем, занимаемый конструкциями валов с лопастями.

$k_V$  – коэффициент, учитывающий отношение объема материала, который захватывается лопастью, к полному объему материала, заключенного в зоне установки лопасти.

$L$  – длина рабочей камеры смесителя, м.

$l_1$  – расстояние от торца рабочей камеры смесителя до крайних лопастей при максимальном угле установки лопастей  $\alpha$ , м.

$l$  – длина элементарного участка дуги, образуемой при движении лопасти, м.

$L_d$  – высота лопасти, м.

$m_{\text{ч}}$  – масса частиц в программной среде EDEM, кг.

$N$  – полное число оборотов лопасти в объеме смешиваемого материала.

$N_i$  – значение потребляемой мощности для  $i$ -того опыта, Вт.

$\bar{N}_i$  – среднеарифметическое значение потребляемой мощности для  $n_0$  опытов, Вт.

$N_{\text{max}}$  – максимальное значение потребляемой мощности из  $n_0$  опытов, Вт.

$n$  – частота вращения вала,  $\text{с}^{-1}$ .

$n_0$  – начальное количество повторных опытов.

$n_{\text{П}}$  – количество повторных опытов.

$n_{\text{пр}}$  – число отобранных проб, шт.

$P_{\text{привл}}$  – общая мощность привода лопастного смесителя, Вт.

$P_{\text{общл}}$  – мощность, затрачиваемая на процесс смешивания в лопастном смесителе, Вт.

$P_1$  – мощность, затрачиваемая на преодоление лобового сопротивления движению лопасти в среде сыпучих материалов, Вт.

$P_2$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о поверхность лопасти, Вт.

$P_3$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о стенки корпуса лопастного смесителя, Вт.

$P_4$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о кронштейн лопасти, Вт.

$P_{\text{л.с.}}$  – мощность, расходуемая на преодоление сил лобового сопротивления, Вт.

$P_{\text{л.с.л}}$  – мощность, которая затрачивается на преодоление силы лобового сопротивления рабочей поверхностью лопасти с учетом вычета миделевых сечений установленных стержневых элементов, Вт.

$P_{л.с.2}$  – величина мощности, расходуемой на преодоление сил сопротивления стержневого элемента цилиндрического профиля, Вт.

$P_{л.с.0}$  – мощность, которая расходуется на преодоление силы лобового сопротивления лопасти при её движении в объеме сыпучего материала без учета установленных стержневых элементов перед её рабочей поверхностью, Вт.

$P_p$  – нагрузка, вызывающая разрушение бетонного образца при испытании на прочность сжатия, Н, кгс.

$P_{прив.эксп}$  – мощность, потребляемая приводом экспериментальной моделью двухвального лопастного смесителя, Вт.

$p$  – давление частиц материала сыпучей среды на лопасть в направлении её движения, Па.

$\bar{p}$  – среднее значение давления, действующего на единицу длины лопасти, Па.

$p_1$  – первый центральный момент в процентном отношении, %.

$Q$  – производительность лопастного смесителя с горизонтальным расположением валов, м<sup>3</sup>/с.

$q$  – отношение идеального значения конечной концентрации  $C_k$  к начальному значению  $C_0$ .

$R_в$  – радиус лопастного вала смесителя, м.

$R_{л.н.}$  – наружный радиус вращения установленных лопастей, м;

$R_{л.внтр.}$  – внутренний радиус вращения установленных лопастей, м;

$R_k$  – внутренний радиус днища корпуса, м.

$R_{н.кр.}$  – наружный радиус вращения кронштейна лопасти, м.

$R_{в.кр.}$  – внутренний радиус вращения кронштейна лопасти, м.

$R_{ср}$  – средний радиус вращения лопастей, м;

$R_ц$  – радиус установленных стержневых элементов цилиндрической формы, м.

$r$  – расстояние от оси вращения, м.

$r_0$  – высота кронштейна лопасти, м.

$S$  – площадь поверхности лопасти, м<sup>2</sup>.

$S_{ц1}, S_{ц2}$  – соответственно площади поверхности первого и второго стержня цилиндрической формы, м<sup>2</sup>.

$S_D$  – оценка дисперсии воспроизводительности.

$S_{\Pi}$  – площадь, на которую действует разрушающая нагрузка  $P_p$ , м<sup>2</sup>.

$S_{\{a_n\}}$  – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

$s_l$  – шаг установки лопастей, м.

$T$  – время полного оборота лопасти в объеме смешиваемых компонентов, с.

$t$  – время смешивания, с.

$t_N$  – время, за которое лопасть совершает  $N$  полных оборотов в объеме смешиваемых компонентов, с.

$t'$  – задаваемое значение времени смешивания для подтверждения адекватности математического выражения, с.

$t_b$  – время, затрачиваемое на выгрузку и очистку рабочей камеры смесителя, с.

$t_3$  – время, затрачиваемое на загрузку рабочей камеры смесителя, с.

$t_{\text{мин.}}$  – минимальное значение времени смешивания, необходимого для достижения заданной концентрации ключевого компонента при рациональных значениях конструктивно-технологических параметров смесителя, с.

$t_k$  – время воздействия лопасти на сыпучий материал, с.

$t_{\text{ст.}}$  – критерий Стьюдента.

$t_{\text{ц}}$  – полное время цикла смешивания, с.

$U_{\text{max}}$  – максимальное отклонение экспериментальных данных от среднего значения.

$V$  – объем рабочей камеры смесителя, м<sup>3</sup>.

$V_c$  – коэффициент неоднородности, %.

$V_l$  – объем смешиваемого материала, который захватывает лопасть, м<sup>3</sup>.

$V_3$  – объем смешиваемого материала, расположенный в зоне установки лопасти, м<sup>3</sup>.

$v$  – линейная скорость движения лопасти, м/с.

$v_r$  – окружная скорость выделенной площадки лопасти, рад/с.

$X_1, X_2 \dots X_n$  – факторы варьирования.

$X_i$  – обозначение фактора варьирования в кодированном виде.

$x_H$  – обозначение фактора варьирования в натуральном виде.

$x_{cp}$  – значение нулевого уровня варьирования фактора.

$x$  – обозначение для сокращения записи выражения.

$Y_0(z)$  – функция Бесселя нулевого порядка второго рода.

$y$  – функция отклика.

$z$  – обозначение для сокращения записи выражения.

$z_{ст}$  – количество установленных стержневых элементов, шт.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамовица М., Стиган И. Справочник по специальным функциям / М.: НАУКА, 1979. – 832 с.
2. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Алабужев П. М. Теории подобия и размерностей. Моделирование: учебное пособие для вузов / П. М. Алабужев, В. Б. Геронимус, Л. М. Минкевич, Б. А. Шеховцов. – М.: Высшая школа, 1968. – 205 с.
4. Андриюшков, А. А. Применение барабанного смесителя центробежного типа для получения сухих строительных смесей / А. А. Андриюшков, Д. В. Сухоруков, А. Б. Евграфова, Н. В. Тиунова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 2(132). – С. 31-38.
5. А. с. 131340 SU. МКИ В 01 F7/04. Перемешивающее устройство / Мочалов Е. И. – № 656037/23 заявл. 24.02.1960, опубл. 24.06.1960, Бюл. №17.
6. А.с. 1308503 SU. МКИ В28 С5/14. Лопастной смеситель непрерывного действия для сыпучих материалов / Попченков П. К., Гамолич В. Я., Дударев И. Р., Трубов В. Т., Рыбников М. В., Горохович А. Ю.; Одесский технологический институт пищевой промышленности. – №3775686/29-33; заявл. 25.07.84; зарегестр. 07.05.87.
7. А.с. 1588434 SU. МКИ В 01 F7/04. Рабочий орган смесителя / Чумаков Е. В., Богданчиков А. С., Андриянова И. Д., Кулиевич Д. С. – №4378559/31-26; заявл. 14.12.87; опубл. 30.08.90, Бюл. № 32.
8. А.с. 778762 SU. В01F7/04. Лопастной смеситель / Поволоцкий Ю. А., Збарский М. Ю., Бурков О. С. // заявитель и патентообладатель Ю. А. Поволоцкий. - заявл. 24.07.1978; опубл. 15.11.1980. Бюл. № 42.
9. Анциферов, С. И. Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей / С. И. Анциферов, Е. Г. Пахотин // сб. докл. VII международного молодежного форума "Образование, наука, производство". – Белгород: Изд-во: БГТУ – 2015. – С. 1402 - 1405.

10. Анциферов, С.И. Повышение эффективности процесса смешивания за счет совершенствования конструкции планетарного смесителя: дис. ...канд. техн. наук – Белгород, 2017.-187 с.
11. Анциферов, С. И. Проектирование двухвального смесителя в CAD/CAM/CAE-системе NX / С. И. Анциферов, Ю. М. Фадин, В. С. Богданов [и др.] // СТИН. – 2022. – № 3. – С. 30-33.
12. Анциферов, С. И. Способ ликвидации застойных зон в смесителях планетарного типа / С. И. Анциферов, Е. Г. Пахотин, Н. Э. Богданов // Сборник: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов Межвузовский сборник статей. – Белгород. – 2014. – С. 19 – 21.
13. Бараев, Р. С. Анализ систем управления производства сухих строительных смесей / Р. С. Бараев, А. А. Мишаев, А. М. Муслимов, Д. М. Местоев // Рефлексия. – 2020. – № 5. – С. 52-56.
14. Баранцева, Е. А. Моделирование и оптимизация процессов смешивания сыпучих материалов: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.17.08, 05.13.01 / Баранцева Елена Александровна. - Иваново, 2010. - 34 с.
15. Баранцева, Е. А. Об оптимальных параметрах перемешивающей лопасти лопастного смесителя сыпучих кормов / Е. А. Баранцева, Ю. В. Хохлова, В. Е. Мизонов, Н. Verthiaux, С. Gatamel // Химия и химическая технология. – 2008. – Том 51. – Вып.7. – С. 108-110.
16. Бардаев, С. В. Исследование рабочего процесса асфальтосмесителей непрерывного действия: Автореф. дис. канд. техн. наук / С. В. Бардаев. – Харьков, 1979. – 24 с.
17. Бардаев, С. В. Расчет мощности лопастного смесителя непрерывного действия / С. В. Бардаев, Н. И. Гурченко // Транспорт. Дорожні та будівельні машини. – 2009. – №1. – С. 57 – 60.
18. Богданов, В. С. Спирально-лопастной смеситель с высокоскоростным режимом смешивания для сухих смесей / В. С. Богданов, Н. П. Несмеянов, П. С. Горшков, Ю. В. Бражник // Фундаментальные исследования в естествен-

нонаучной сфере и социально-экономическое развитие Белгородской области, Белгород, 01–30 октября 2013 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Том 1. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2013. – С. 13-17.

19. Богомолов, А. А. Модель процесса смешивания с учетом реологических свойств смеси / А. А. Богомолов, А. С. Корнеев, А. В. Ростовцев // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2007. – № 38. – С. 90 – 92.
20. Богомолов, А. А. Теоретические и технические основы совершенствования смесительных машин для приготовления строительных смесей: монография / А. А. Богомолов. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2010. – 151 с.
21. Борщев, В. Я. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие. / В. Я. Борщев, Ю. И. Гусев, М. А. Промтов, А. С. Тимонин. – М.: Изд. Машиностроение-1, 2006. – 208 с.
22. Ботка, Е. Н. Рынок сухих строительных смесей России: рост несмотря ни на что / Е. Н. Ботка // Цемент и его применение. – 2021. – № 2. – С. 32-33.
23. Бражник, Ю. В. Лопастной смеситель для сухих строительных смесей с высокоскоростным режимом работы / Ю. В. Бражник, Н. П. Несмеянов, П. С. Горшков. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – 131 с.
24. Бралиев, М. К. Классификация смесителей сухих рассыпных кормов / М. К. Бралиев, А. И. Завражнов, С. М. Ведищев [и др.] // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК : материалы Международной научно-практической конференции, Мичуринск-наукоград РФ, 26–28 октября 2021 года. – Мичуринск-наукоград РФ: Мичуринский государственный аграрный университет, 2021. – С. 32-36.

25. Бродский, Ю. А. Оборудование для производства сухих строительных смесей / Ю. А. Бродский, Б. Б. Чурилин // Строительные материалы. – 2000. – № 5. – С. 26-27.
26. Васин, В. М. Анализ потоков сыпучих материалов в смесителях непрерывного действия и их математические модели / В. М. Васин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 9. – С. 19-27.
27. Ведищев С. М. Исследование коэффициента лобового сопротивления лопатки / С. М. Ведищев, Н. В. Хольшев, А. В. Прохоров, А. А. Кажияхметова, М. А. Бралиев // Наука в центральной России. – 2019. – № 3(39). – С. 30-36.
28. Ведищев, С. М. Обзор и анализ конструкций смесительных устройств / С. М. Ведищев, А. И. Завражнов, А. В. Прохоров, Е. Б. Ложкина // Наука в центральной России. – 2022. – № 4(58). – С. 91-101.
29. Воронин, В. В. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов / В. В. Воронин, К. А. Адигамов, С. С. Петренко, Р. А. Сизякин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4-2(23). – С. 36.
30. Гаврилов, В. С. Функции Бесселя в задачах математической физики: учебно-методическое пособие / В. С. Гаврилов, Н. А. Денисова, А. В. Калинин. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2014. – 40 с.
31. Гарабажиу, А. А. Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей / А. А. Гарабажиу // Строительная наука и техника – 2010. – № 4. – С. 27–42.
32. Гердт, Д. А. Анализ существующих помольно-смесительных агрегатов для малотоннажных технологий / Д. А. Гердт, В. А. Шаталов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1773-1776.

33. Гончарюк, А. А. Моделирование процесса смешивания в кормоприготовлении / А. А. Гончарюк // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства : Сборник статей VI Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Пензенского государственного аграрного университета, Пенза, 15–16 февраля 2021 года. – Пенза, 2021. – С. 33-35.
34. Горшков, П. С. Роторный спирально–лопастной смеситель периодического действия: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / П.С. Горшков – Белгород, 2013. – 169 с.
35. Горшков, П. С. Роторный спирально–лопастной смеситель периодического действия: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / П.С. Горшков – Белгород, 2013. – 18 с.
36. Гречихин Л. И. Сила давления воздуха на движущуюся пластину / Л. И. Гречихин // Военно-технический вестник. – 2014. – №4. – С. 38–50.
37. Демин, О. В. Влияние сил гравитации на процесс смешивания сыпучих материалов / О. В. Демин // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – Т. 8. – № 4. – С. 82-85.
38. Демин, О. В. Интенсификация смешивания сыпучих материалов в лопастном смесителе / О. В. Дёмин, В. Ф. Першин, Д. О. Смолин // Химия и химическая технология. – 2012. – № 8. – С. 108 – 111.
39. Демин, О. В. К вопросу о моделировании процесса смешивания сыпучих материалов в лопастных смесителях / О. В. Дёмин, М. М. Свиридов, В. Ф. Першин // Химия и химическая технология. – 2010. – № 1. – С. 97 – 99.
40. Демин, О. В. Пути повышения эффективности смешивания сыпучих материалов / О. В. Демин, М. М. Свиридов, В. Ф. Першин // Химия и химическая технология. – 2010. – № 6. – С. 97-99.
41. Демин, О. В. Совершенствование методов расчета и конструкций лопастных смесителей: специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)": дис. ...канд. техн. наук. / О. В. Демин. – Тамбов, 2003. – 210 с.

42. Долматова, А. М. Пути устранения недостатков планетарных смесителей в производстве сухих строительных смесей / А. М. Долматова, А. А. Мурзанаев, А. А. Бражник // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25–27 мая 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 2524-2530.
43. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин: учеб. пособие для вузов / Дунаев П. Ф., Леликов О. П.; ред. Ряховский О. А. – 14-е изд., испр. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 564 с.: рис., табл. – (Terra Mechanica). – Библиогр.: с. 560.
44. Егоров, А. А. Метод Фурье решения смешанных задач для неоднородных гиперболических уравнений с постоянными коэффициентами: учебно-методическая разработка для студентов физического факультета и факультета радиофизики и компьютерных технологий / А. А. Егоров, И. В. Рыбаченко; БГУ, Физический фак., Каф. высшей математики и математической физики. – Минск: БГУ, 2021. – 58 с.
45. Ельцов, М. Ю. Исследование режимов работы ШБМ с различными внутрибарабанными устройствами в по EDEM / М. Ю. Ельцов, П. А. Хахалев, Н. П. Харин // Научно-технические технологии и инновации: электронный сборник научных докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 06–07 октября 2016 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 69–72.
46. Жилкибаева, А. М. Научные аспекты управления реологическими характеристиками бетонной смеси / А. М. Жилкибаева, А. С. Естемесова // Вестник Ошского государственного университета. – 2020. – № 1-1. – С. 1-4.
47. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: «Наука», 1976. – 390 с.
48. Зенков Р. Л. Машины непрерывного транспорта / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Колобов // Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1987. — 432 с.

49. Золотухин, В. И. Смесители интенсивного действия производства НПП "Вулкан-ТМ" (разработка, эксплуатация, импортозамещение) / В. И. Золотухин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 3-6.
50. Зубов, В. И. Функции Бесселя: учебно-методическое пособие / В. И. Зубов. – М.: МФТИ, 2007. – 51 с.
51. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
52. Камчатнов, Л. П. Исследования по определению оптимальных параметров мешалок асфальтосмесителей периодического действия: Автореф. дис. канд....техн. наук / Л. П. Камчатнов. – Саратов, 1966. – 24 с.
53. Канторович, З. Б. Машины химической промышленности / З. Б. Канторович. – М.: Машиностроение, 1965. – 416 с.
54. Капранова, А. Б. Моделирование процесса ротационного смешивания сыпучих компонентов на платформе кибер-физических систем / А. Б. Капранова, Д. Д. Бахаева, Д. В. Стенько, И. И. Верлока // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2020. – Т. 4. – С. 20-26.
55. Керов, И. П. Исследование работы дорожных лопастных мешалок и расчет потребляемой ими мощности: автореф. дис. канд... техн. наук / И. П. Керов. - Москва, 1952. - 20 с.
56. 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.
57. 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.
58. 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
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. 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.

63. 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.
64. 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.
65. 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: Посвящена 165-летию В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 2145-2149.
66. 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.
67. Кикин, Н. О. Сравнительная характеристика двухвальных смесителей отечественного производства / Н. О. Кикин, Д. Г. Самойленко, Н. В. Болотни-

- кова, 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.
68. Константинопуло, Г. С. Примеры и задачи по механическому оборудованию заводов: учебное пособие. / Г. С. Константинопуло. – М.: «Высшая школа», 1975 – 284 с.
69. Копылов, И. А. Строительный форум "Цемент. Бетон. Сухие смеси" / И. А. Копылов // . – 2022. – № 2(181). – С. 10-14.
70. Королев, К. М. Методика расчета лотковых смесителей / К. М. Королев // Строительные и дорожные машины. – 1985. – №1. – С. 14-16.
71. Кравцов, С. Л. Об улучшении конструкций мешалок периодического действия асфальтосмесителей / С. Л. Кравцов // Строительные и дорожные машины. – 1965. – №2. – С. 9-11.
72. Краснов, В. В. Обзор конструкций смесителей для производства сухих многокомпонентных смесей / В. В. Краснов, В. А. Уваров, Т. Н. Орехова // Научный альманах. – 2016. – № 10. – С. 191 - 194.
73. Кузьмина, Н. В. Разработка технологии производства сухой смеси для супа с применением барабанного смесителя / Н. В. Кузьмина, А. П. Коваленко, Д. В. Сухоруков // Кузбасс: образование, наука, инновации. Молодежный вклад в развитие научно-образовательного центра "Кузбасс": Материалы X Инновационного конвента, Кемерово, 30 января 2022 года. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 142-144.
74. Лапина, В. А. Возможная классификация устройств для производства смесей сыпучих материалов / В. А. Лапина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 10. – С. 473-475.
75. Лебедев, А. Е. Метод оценки коэффициента неоднородности смесей сыпучих сред / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. А. Петров // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4-1(31). – С. 4.

76. Лебедев, А. Е. Новые способы смешения сыпучих сред и аппараты для их осуществления / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, С. Т. Суид, И. И. Шеронина // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6-2. – С. 264-268.
77. Лебедев, А. Т. Ресурсосберегающие направления совершенствования эксплуатации и ремонта машин и оборудования сельскохозяйственного производства: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Т. Лебедев. – зерноград, 2012. – 40 с.
78. Лымарь, И. А. Силовой расчет взаимодействия рабочего органа с компонентами смеси в смесителе периодического действия / И. А. Лымарь, С. Ю. Лозовая, Н. М. Лозовой, П. С. Самсонова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 438-445.
79. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю.И. Макаров – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
80. Мамаев, Л. А. Влияние реологических характеристик бетонных смесей на мощность, потребляемую приводом рабочего органа бетоноотделочных машин / Л. А. Мамаев, И. С. Ситов, Е. В. Ефимова // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. – 2012. – № 6. – С. 70-78.
81. Мартынов, В. Д. Строительные машины и монтажное оборудование: учебное пособие. / В. Д. Мартынов, Н. И. Алешин, Б. П. Морозов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
82. Морозов, М. К. Механическое оборудование заводов сборного железобетона / М. К. Морозов. – Киев: Высшая школа, – 1986. – 311 с.
83. Мухачев, В. А. Планирование и обработка результатов эксперимента: учебное пособие / В.А. Мухачев. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 118 с.
84. Овдиенко, М. В. Оптимизация конструкции и технологии изготовления лопастного вала горизонтального смесителя СГ-2 / М. В. Овдиенко, А. А.

- Мецлер, С. А. Томилин, Е. С. Арсентьева // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1(44). – С. 33.
85. Орехова, Т. Н. Обзор пневмосмесителей для производства сухих дисперсно-армированных смесей / Т. Н. Орехова, А. Е. Качаев, Г. И. Чемеричко // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 23–25 сентября 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 182 – 187.
86. Павленко, А. А. Использование EDEM solution в исследовании оборудования промышленности строительных материалов / А. А. Павленко, В. В. Саплинова // 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. 272–276.
87. Парамонова, М. С. Методика оценки качества в производстве сыпучих смесей / М. С. Парамонова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 6. – С. 321-325.
88. Пат. 2233197 РФ, МКИ В01 F7/04, 3/18. Способ приготовления смеси сыпучих материалов и установка для его осуществления / Першин В. Ф., Демин О. В. // заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет. – № 2002100969/15; заявл. 08.01.2002; опубл. 27.07.2004.
89. Пат. 2508937 РФ, МПК В01F9/02. Барабанный смеситель. / Иванец В.Н., Бородулин Д.М., Комаров С.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - №2012128003/05; заявл. 03.07.2012; опубл. 10.03.2014. Бюл. № 2012128003/05.

90. Пат. 2527237 РФ, МПК В01F 7/18, В01F 7/30. Планетарный лопастной смеситель. / Светлов С.А., Светлова О.Р., Левина Н.С., Почеревин А.В.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2013110895/05; заявл. 12.03.2013; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.
91. Пат. 2527237 Российская Федерация, МПК В01F 7/18. Планетарный лопастной смеситель / С. А. Светлов, О. Р. Светлова, Н. С. Левина, А. В. Почеревин; заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И. И. Ползунова. № 2013110895/05, заявл. 12.03.2013; опубл. 27.08.2014; Бюл. №24. 2014. 7 с.
92. Пат. 54531 РФ. МПК В01F7/04. Смеситель материалов / Лебедев А. Т., Захарин А. В., Лебедев П. А., Слюсарев А. С., Слюсарев А. Н. // заявитель и патентообладатель Ставропольский государственный аграрный университет. – заявл. 08.06.2005; опубл. 10.07.2006. Бюл. № 19.
93. Пат. № 192657 РФ. МПК В28С 5/14, В01F 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.
94. Почеревин, А. В. Планетарный лопастной смеситель для смешивания дисперсных материалов с вязкими средами / А. В. Почеревин // Управление инновациями: теория, методология, практика. – № 14. – 2015. – С. 102-106.
95. Пулин В. П. Повышение энергетической эффективности бетоносмесителей циклического принудительного действия: дис... канд. техн. наук: 05.02.16 / Пулин Вениамин Павлович. – Днепропетровск, 1984. – 174 с.
96. Ратников, С. А. Исследование работы центробежно-лопастного смесителя сыпучих материалов на высокоскоростных режимах / С. А. Ратников, М. Н. Потапова, А. И. Семененко // Пищевые инновации и биотехнологии : Сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 17 мая 2022 года / Под общей редакцией

- А.Ю. Просекова. Том 2. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 69-70.
97. Сапожников, М. Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. – М.: Высшая школа, 1971. – 382 с.
98. Саутин, С. Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С. Н. Саутин. – Ленинград: Химия, 1975. – 48 с.
99. Сахаров, С. Е. Расчет мощности, затрачиваемой на процесс смешивания в смесителе зерновых компонентов комбикормов / С. Е. Сахаров, М. Ю. Колобов, В. В. Колобова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2015. – № 2(42). – С. 152-155.
100. Севров, К. П. Установки для приготовления асфальто-бетонных и битумо-минеральных смесей. / К. П. Севров, Л. П. Камчатков. – М.: Машиностроение, 1971. – 129 с.
101. Селиванов, Ю. Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств: монография / Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин - Москва: "Издательство Машиностроение-1", 2004. – 120 с.
102. Сизиков, С. А. Мобильный бетоносмеситель непрерывного действия для приготовления жёстких бетонных смесей в условиях стройплощадки / С. А. Сизиков, В. С. Сизиков, С. В. Репин, С. А. Евтюков // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 5. – С. 3-8.
103. Смолина, И. О. К вопросу о моделировании процесса смешивания сыпучих материалов в лопастных смесителях / И. О. Смолина, Д. О. Смолин, О. В. Демин // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-1. – С. 93-94.
104. Студеникин, А. В. Анализ способов и средств смешивания сыпучих материалов / А. В. Студеникин, У. К. Сабиев // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК : Сборник материалов Международной научно-практической конференции обучающихся,

- посвященной 90-летию со дня рождения Е.П. Огрызкова, Омск, 15 января 2019 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. – С. 324-329.
105. Технологическое оборудование комбикормовых предприятий // Комбикорма. – 2017. – № 6. – С. 47-58.
106. Титов, А. Ю. Конструкционные предпосылки модернизации лопастных смесителей / А. Ю. Титов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1. – С. 77-79.
107. Уваров, В. А. Анализ оборудования непрерывного действия для смешивания сухих многокомпонентных смесей / В. А. Уваров, Т. Н. Орехова, В. В. Краснов // Научный альманах. – 2016. – № 10. – С. 313-315.
108. Фадин, Ю. М. Использование пневмосмесительного оборудования для производства сухих строительных смесей / Ю. М. Фадин, О. М. Шеметова // . – 2022. – № 1(11). – С. 43-47.
109. Фадин, Ю. М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства / Ю. М. Фадин, О. М. Шеметова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2020. – №12. – С.145-150.
110. Фомина, М. В. Влияние коэффициента интенсивности перемешивания на конструкцию смесителя непрерывного действия / М. В. Фомина, А. С. Калиганов, А. В. Чупшев, В. П. Терюшков // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2014. – № Т20. – С. 1056-1060.
111. Фролов, В. А. Влияние пластин вблизи круглого цилиндра на лобовое сопротивление / В. А. Фролов, А. С. Козлова // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов в 4-х томах, Уфа, 19–24 августа 2019 года. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. – С. 449-450.
112. Фудин, К. П. Влияние угла установки барабана смесителя на качество смеси / К. П. Фудин, В. П. Терюшков, А. В. Чупшев, В. В. Коновалов // Наука в центральной России. – 2020. – № 3(45). – С. 12-19.

113. Ханзаров, А. С. Возможности определения коэффициента неоднородности сухой строительной смеси в лопастном смесителе / А. С. Ханзаров, Н. О. Кикин, Е. Г. Ханина // 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, 2021. – С. 284-290.
114. 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.
115. 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.
116. 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.
117. 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.
118. Хольшев, Н. В. Определение параметров шнеколопастного смесителя / Н. В. Хольшев, В. А. Мухин, С. С. Петрова // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 1. – С. 28-37.

119. Хольшев, Н. В. Совершенствование технологического процесса приготовления сухих рассыпных кормосмесей шнеколопастным смесителем: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Хольшев Николай Васильевич. – Тамбов, 2015. – 209 с.
120. Чемеричко, Г. И. Повышение эффективности работы двухвальных лопастных бетоносмесителей непрерывного действия: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.16 / Чемеричко Галина Ивановна. - М., 1985. - 216 с.
121. Чемеричко, Г. И. Тенденции совершенствования смесительного оборудования / Г. И. Чемеричко, Е. Г. Пахотин // Научно-технические инновации. - Электронный сборник научных докладов Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 254-258.
122. Чехлов, А. В. Анализ состояния техники смешивания сыпучих материалов / А. В. Чехлов // Механики XXI века. – 2019. – № 18. – С. 110-122.
123. Чехлов, А. В. Усовершенствованная конструкция планетарного смесителя / А. В. Чехлов // Механики XXI века. – 2019. – № 18. – С. 122-127.
124. Шеметова, О. М. Обзор смесителей для смешения сухих смесей / О. М. Шеметова, Ю. М. Фадин, Е. Г. Шеметов // Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии: сб. докл. нац.конф., Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2021. – С. 147 – 151.
125. Шеметова, О. М. Обзор фирм производителей пневматических смесителей для производства сухих строительных смесей / О. М. Шеметова, Е. Г. Шеметов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: Сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 8. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 62-66.
126. Шестаков, Ю. Г. Агрегат пневматического действия для производства сухих строительных смесей / Ю. Г. Шестаков, М. А. Романович, Т. Н. Орехова, А. Н. Унковский // Международная научно-техническая конференция

- молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 20 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 2399-2402
127. Шубин, И. Н. Методы анализа смесей сыпучих материалов / И. Н. Шубин, Н. С. Потемкин, Т. В. Гурова, В. Ю. Кондратьев // Ученые записки Тамбовского отделения РoСМУ. – 2014. – № 2. – С. 283-287.
128. Afzal, A. Performance evaluation of three types of passive micro mixer with convergent-divergent sinusoidal walls / A. Afzal, K.-Y. Kim // Journal of Marine Science and Technology. – 2014. – Vol. 22. – No. 6. – P. 680–686.
129. Antsiferov, S. I. Modeling the Mixing Process in Construction Using EDEM Solution Software / S. I. Antsiferov, V. V. Tibeykin, Y. M. Fadin, A. V. Karachevtseva // Digital Technologies in Construction Engineering: Selected Papers, Springer, 2022. – P. 115-124.
130. Chee, B. C. Optimization of Mix Proportion of High Performance Mortar for Structural Applications / B. C. Cheah, M. Ramli // American J. of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – № 3. – P. 643-649.
131. Chiara, F. Ferraris Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art / Chiara F. Ferraris // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 2001. – № 2. – P. 391-399.
132. Dapena, E. Effect of recycled sand content on characteristics of mortars and concretes / E. Dapena, P. Alaejos, A. Lobet, D. Pérez // J. Mater. Civ. Eng. – 2011. – № 23 (4). – P. 414-422.
133. Jia, S. Simulation Analysis And Construction Of Maize Seeder Model based On EDEM (em Solutions EDEM) / S. Jia, J. Yu, T. Ghayekhloo // INMATEH - Agricultural Engineering. – 2021. – Vol. 63. – No 1. – P. 365-374.
134. Khanin, S. I. 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. Springer. – 2022. – P. 175-182.

135. Perevozchikova, S. V. Dry mix mortar for restoration of buildings / S. V. Perevozchikova, V. V. Belov // *Smart Composite in Construction*. – 2021. – Vol. 2. – No 1. – P. 14-19.
136. Silva, G. A. D. Study of the influence of the mortar fine recycled aggregate ratio and the mixing sequence on the behavior of new mortars / G. A. D. Silva, Leite M. B. // *Ambiente Construído*. – 2018. – № 18. – P. 53-69.
137. Thamboo, J. Characterisation and mix specification of commonly used masonry mortars / J. Thamboo, N. Jayarathne, A. Bandara // *SN Appl. Sci.* – 2019. – № 1. – PP. 292.
138. Valigi, M. C. Wear resistance of blades in planetary concrete mixers / M. C. Valigi, S. Logozzo, M. Rinchi // *Design of a new improved blade shape and 2D validation. Tribol. Int.* – 2016. – No 96. – P. 191–201.
139. Yang, J. DEM analysis of particle adhesion during powder mixing for dry powder inhaler formulation development / J. C. Yang, Y. Wu, M. J. Adams // *Computational Particle Mechanics: Springer Berlin Heidelberg*. – 2016. – № 34. – P. 477–504.
140. Yang, M. Influences of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste / M. Yang, H.M. Jennings // *Adv. Cem. Based Mater.* – 1995. – № 2 (2). – P. 70-78.
141. Yao, Y. A Double-Blade Mixer for Concrete with Improved Mixing Quality / Y. Yao, Z. Feng, S. Chen, B. Q. Li, L. Zhao, W. Zhao // *Arab. J. Sci. Eng.* – 2016. – No. 41. – P. 4809–4816.
142. Yao, Y. Strength of concrete reinforced using double-blade mixer / Yao, Y.; Feng, Z.; Chen, S. // *Mag. Concr. Res.* – 2013. – No. 65. – P. 787–792.

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 192657

**СМЕСИТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

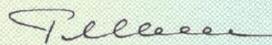
Авторы: *Ханин Сергей Иванович (RU),  
Кикин Николай Олегович (RU)*

Заявка № 2019119931

Приоритет полезной модели 25 июня 2019 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 25 сентября 2019 г.Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 25 июня 2029 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

«УТВЕРЖДАЮ»  
 генеральный директор  
 ООО «Экохим-Инкапол»  
 \_\_\_\_\_  
 Али-Ага Валерий Михайлович  
 «10» октября 2022 года



### АКТ

внедрения стержневых элементов цилиндрического профиля на одновальном лопастном смесителе периодического действия СГО-4 и его производственных испытаний

Мы, нижеподписавшиеся, от ООО «Экохим-Инкапол» руководитель производственно-технического отдела Малиновская Л. М., главный технолог Мишнева И. Г.; от ФГБОУ «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В. Г. Шухова): профессор, д-р техн. наук Ханин С.И., доцент, канд. техн. наук Мордовская О.С., инженер Кикин Н.О. составили настоящий акт, что на предприятии ООО «Экохим-Инкапол» на одновальном смесителе СГО-4 для получения сухих строительных смесей внедрены и успешно эксплуатируются стержневые элементы цилиндрического профиля, установленные перед рабочими поверхностями лопастей, в соответствии с патентом РФ на полезную модель № 192657.

Цель испытаний - установление эффективности применения стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей. Техническая характеристика смесителя СГО-4 до и после модернизации представлена в таблице 1.

Каждый из стержневых элементов выполнен из двух стержней цилиндрического профиля диаметром 0,008 м, расположенных перпендикулярно друг другу и неподвижно соединенных сваркой. Первый стержень имеет длину  $55 \times 10^{-3}$  м, а второй, предназначенный для крепления, с метрической резьбой по всей его длине, -  $40 \times 10^{-3}$  м. Лопастей смесителя выполнены в форме пластин, с криволинейными сторонами, ограниченными концентричными дугами с радиусами  $R_1 = 154 \times 10^{-3}$  м и  $R_2 = 219 \times 10^{-3}$  м, и расположенными по нормали к ним прямолинейными сторонами. Расстояние между прямолинейными сторонами в наиболее широкой части лопасти составляет  $65 \times 10^{-3}$  м. В лопастях, у наиболее приближенных к лопастному валу криволинейных сторон и ограничивающих их прямолинейных сторон, выполнены сквозные крепежные отверстия. Через эти отверстия резьбовыми соединениями к лопастям попарно и неподвижно прикреплены стержневые элементы со стороны поверхностей лопастей, взаимодействующих с перемешиваемым материалом. У стержневых элементов продольные оси стержней длиной  $55 \times 10^{-3}$  м параллельны рядом расположенным прямолинейным образующим соответствующих лопастей.

В предложенной модели смесителя приготавливалась наполная цементно-песчаная смесь классом прочности В12,5 по ГОСТ 31358–2019 в двух

вариантах соотношения компонентов. В качестве сырьевых компонентов использовался кварцевый песок по ГОСТ 8736–2014 крупностью от 0,3 до 1,0 мм и цемент марки ПЦ500-Д0 по ГОСТ 10178–85.

По первому варианту состава смеси содержание песка составляло 80 %, цемента – 20 %. Смесь соответствовала СП 82-101-98 и рецептуре, применяемой на предприятии.

По второму варианту состава смеси содержание песка составляло 82 %, цемента – 18 %. Рецептура подбиралась при производственных испытаниях.

Таблица 1. Техническая характеристика одновального лопастного смесителя СГО-4

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя
Объем рабочей камеры смесителя	$V$	м <sup>3</sup>	$6,4 \times 10^{-2}$
Коэффициент заполнения рабочей камеры смесителя	$k_3$	-	0,8
Частота вращения лопастного вала	$n$	с <sup>-1</sup>	0,9...1,5
Номинальная мощность установленного электродвигателя	$N_{\text{прив}}$	кВт	1,8
Масса загружаемых материалов	$m_m$	кг	80
Время цикла смешивания в смесителе: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$t_{ц1}$ $t_{ц2}$ $t_{ц3}$	с	180
Часовая производительность смесителя: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$Q_ч$	кг/ч	1760

Коэффициент неоднородности определялся гравиметрическим методом.

Испытания по определению прочности на сжатие проводились при температуре  $(20 \pm 2)$  °С и относительной влажности воздуха  $(60 \pm 10)$  % в соответствии с ГОСТ Р 58277–2018.

В период опытно-промышленных испытаний контролировались следующие технологические параметры: коэффициент неоднородности готовой смеси,  $V_c$ , предел прочности бетонных образцов на сжатие, полученных из приготовленной сухой смеси,  $\sigma_{сж}$ , МПа. Для каждого вида испытания отбор проб и их анализ проводились лабораторией предприятия в течение трех смен через 2 часа.

Характеристики смесей, полученных в результате промышленных испытаний, показаны в таблице 2.

Таблица 2. Характеристика смесей, приготовленных в одновальном лопастном смесителе СГО-4

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя
Коэффициент неоднородности смеси, приготовленной в смесителе: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$V_{c1}$	%	4,85...5,01
	$V_{c2}$		4,25...4,38
	$V_{c3}$		4,53...4,67
Предел прочности на сжатие бетонных образцов, полученных из смеси, приготовленной в смесителе: - без стержневых элементов при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 20 % - со стержневыми элементами при содержании цемента в смеси 18 %	$\sigma_{сж1}$	МПа	17,94...18,48
	$\sigma_{сж2}$		19,97...20,57
	$\sigma_{сж3}$		18,39...18,79

## Выводы:

1. Приготовление в смесителе цементно-песчаных смесей с содержанием цемента 20 % при использовании стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей позволило достичь следующих показателей по сравнению с вариантом отсутствия перед рабочими поверхностями лопастей стержневых элементов:

- снижение коэффициента неоднородности с 4,85 % до 4,38 % - относительное изменение составило 9,69 %;
- повышение предела прочности на сжатие бетонных образцов, изготовленных из полученной сухой смеси с 18,48 МПа до 19,97 МПа - изменение составило 8,06 %.

2. Приготовление в смесителе цементно-песчаной смеси с пониженным содержанием цемента 18 % при использовании стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей обеспечило требуемое ГОСТ 31358-2019 ее качество: значения коэффициента неоднородности в диапазоне  $V_{c3}=4,53...4,67$  %, предела прочности на сжатие приготовленных из смеси бетонных образцов -  $\sigma_{сж3}=18,39...18,79$  МПа. Применение в смесителе стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей позволило уменьшить содержание цемента в приготавливаемой смеси с 20 % до 18 %. Уменьшение содержания цемента относительно его массы по рецептуре предприятия составило 9,8 %.

От ООО «Экохим-Инкапол»

Малиновская Л. М.

Мишнева И. Г.

От ФГБОУ ВПО

БГТУ им. В. Г. Шухова

Ханин С. И.

Мордовская О.С.

Кикин Н. О.



об использовании результатов диссертационной работы Кикина Николая  
 Олеговича в учебном процессе БГТУ им. В. Г. Шухова

Комиссия в составе:

Сергей Игоревич Анциферов – и. о. заведующего кафедрой механического  
 оборудования, к.т.н., доцент – председатель комиссии,

Юрий Михайлович Фадин – к.т.н., профессор кафедры механического  
 оборудования – член комиссии,

Матусов Михаил Геннадьевич – к.т.н., заведующий лабораторией кафедры  
 механического оборудования – член комиссии

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы  
 Кикина Н. О. «Совершенствование процесса смешивания материалов в  
 горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами»  
 используются в учебном процессе в БГТУ им. В. Г. Шухова при подготовке  
 студентов по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и  
 оборудование» - профиль программы «Технологические машины и комплексы  
 предприятий строительных материалов» и направлению подготовки 15.04.02  
 «Технологические машины и оборудование» - профиль программы  
 «Разработка технологического оборудования и комплексов предприятий  
 строительной индустрии».

Председатель комиссии:

С. И. Анциферов

Члены комиссии:

Ю. М. Фадин

М. Г. Матусов

«УТВЕРЖДАЮ»

финансовый директор

ООО «Экохим-Инкапол»

Пономарева Гатьяна Станиславовна

«10» октября 2022 года



**Расчет экономического эффекта от использования смесителя с установленными стержневыми элементами на ООО «Экохим-Инкапол»**

Данный расчет предназначен для подтверждения экономической целесообразности внедрения технического решения в виде установленных стержневых элементов цилиндрического профиля перед рабочей поверхностью лопасти на примере горизонтального лопастного смесителя СГО-4.

В данном разделе представлен расчет экономической эффективности от технического решения на заводе ООО «Экохим-Инкапол». Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатель	Обозначение	Единица измерения	СГО-4 до внедрения	СГО-4 после внедрения
Производительность смесителя за один цикл смешивания	$Q$	кг	80	80
Коэффициент использования оборудования во времени	$K_{эк}$	-	0,7	0,7
Стоимость оборудования	$Ц_3, Ц_4$	руб.	214 000	235 500
Норма амортизации оборудования	Н.А.	%	8	8
Цена 1 кг. цемента ПЦ500Д0	$Ц_1$	руб.	9,1	9,1
Цена 1 кг. песка (0,3...0,8)	$Ц_2$	руб.	5,68	5,68
Коэффициент неоднородности готовой смеси	$V_c$	%	4,93...4,85	4,33...4,25
Предел прочности на сжатие бетона	$\sigma_{сж}$	МПа	17,94...18,29	19,97...20,41

Вычислим количество циклов смешивания  $N_{ц.см.}$  за один час с учетом продолжительности цикла смешивания:

$$N_{ц.см.} = \frac{3600}{t_{ц}}, \quad (1)$$

где  $t_{ц}$  – время цикла смешивания,  $t_{ц}=163$  с.

$$N_{ц.см.} = \frac{3600}{163} = 22,09 \text{ цикла в час.}$$

Рассчитаем производительность смесителя СГО-4 за одну рабочую смену с учетом коэффициента использования оборудования во времени:

$$Q_{см} = Q \cdot N_{ц.см.} \cdot K_{эк} \cdot t_{смены}, \quad (2)$$

где  $t_{смены}$  – продолжительность смены,  $t_{смены}=8$  ч.

$$Q_{см} = 80 \cdot 22 \cdot 0,7 \cdot 8 = 9894 \text{ кг.}$$

Годовая производительность смесителя СГО-4 в тоннах будет равна:

$$Q_{см.год.} = \frac{365 \cdot Q_{см}}{1000} \quad (3)$$

$$Q_{см.год.} = \frac{365 \cdot 9894}{1000} = 3611,485 \text{ т.}$$

Рассчитаем материальные затраты на приготовление сухой цементно-песчаной смеси с соотношением песка к цементу 5:1, которая приготавливается в смесителе СГО-4 до внедрения технического решения.

Исходя из соотношения компонентов смеси, для суточного производства необходимо  $m_{ц1}=1979$  кг цемента и  $m_{п1}=7916$  кг песка. Цена одного килограмма цемента составляет  $Ц_1=9,1$  руб., а песка (фракция 0,315...0,8 мм) –  $Ц_2=5,68$  руб. Рассчитаем материальные затраты на приготовление цементно-песчаной смеси исходя из потребности в сырье:

$$C_1 = m_{ц1} \cdot Ц_1 + m_{п1} \cdot Ц_2. \quad (4)$$

$$C_1 = 1979 \cdot 9,1 + 7916 \cdot 5,68 = 62968,46 \text{ руб.}$$

В результате промышленного внедрения устройства в виде стержневых элементов цилиндрической формы установлено, что прочность бетона повышается на 10,39 %. В связи с этим предложено сократить содержание цемента в рецептуре на 9,8 %. Это позволит снизить себестоимость приготовления цементно-песчаной смеси, при условии, что остальные

расходы (заработная плата персонала, затраты электроэнергии) будут оставаться неизменными.

Рассчитаем материальные затраты на приготовление цементно-песчаной смеси в смесителе СГО-4 после внедрения технического решения.

Для суточного производства понадобится  $m_{ц2}=1781$  кг цемента и  $m_{п2}=8113$  кг песка. Цены на сырьевые материалы остаются прежними. Стоимость материальных затрат на приготовление смеси будет равна:

$$C_2 = m_{ц2} \cdot Ц_1 + m_{п2} \cdot Ц_2. \quad (5)$$

$$C_2 = 1781 \cdot 9,1 + 8113 \cdot 5,68 = 62291,68 \text{ руб.}$$

Разница между материальными затратами на приготовление смеси в смесителе до внедрения технического решения и после его внедрения за одну смену определяется из выражения:

$$\Delta C = C_1 - C_2, \quad (6)$$

$$\Delta C = 62968,46 - 62291,68 = 676,78 \text{ руб.}$$

За год работы с учетом коэффициента использования смесителя во времени разница между материальными затратами составляет  $\Delta C_{\text{год}}=172917,89$  руб.

Стоимость базового оборудования составляла  $Ц_3=214000$  руб. Стоимость спроектированного оборудования с учетом затраты средств на внедрение технического решения, а также на материалы и изготовление внедряемого устройства составила  $Ц_4=235000$  руб. Изменение основных фондов  $\Delta O_{\phi}$  определяем по формуле:

$$\Delta O_{\phi} = Ц_4 - Ц_3. \quad (7)$$

$$\Delta O_{\phi} = 235500 - 214000 = 21500 \text{ руб.}$$

Затраты на амортизацию составляют 8 % от  $\Delta O_{\phi}$ :

$$З_{\text{ам}} = \Delta O_{\phi} \cdot 8\%. \quad (8)$$

$$З_{\text{ам}} = 21500 \cdot 8\% = 1720 \text{ руб.}$$

Затраты на проведение текущего и капитального ремонтов составляют 15 % от изменения основных фондов:

$$Z_{\text{кт.рем.}} = \Delta O_{\phi} \cdot 15\%. \quad (9)$$

$$Z_{\text{кт.рем.}} = 21500 \cdot 15\% = 3225 \text{ руб.}$$

Затраты на эксплуатацию составляют 3 % от  $\Delta O_{\phi}$ :

$$Z_{\text{экспл}} = \Delta O_{\phi} \cdot 3\%. \quad (10)$$

$$Z_{\text{экспл}} = 21500 \cdot 3\% = 645 \text{ руб.}$$

Суммарное изменение текущих затрат равно:

$$Z_{\text{тек}} = Z_{\text{ам}} + Z_{\text{кт.рем.}} + Z_{\text{экспл.}} \quad (11)$$

$$Z_{\text{тек}} = 1720 + 3225 + 645 = 5590 \text{ руб.}$$

Снижение себестоимости готовой продукции  $\Delta C_{\text{итог}}$  с учетом внедрения стержневых элементов в конструкцию смесителя составит:

$$\Delta C_{\text{итог}} = \Delta C_{\text{год}} - Z_{\text{тек}}. \quad (12)$$

$$\Delta C_{\text{итог}} = 172917,89 - 5590 = 167327,89 \text{ руб.}$$

Прибыль от внедрения технического решения определяется разницей между себестоимостями цементно-песчаной смеси до внедрения и после:

$$\Delta П = \Delta C_{\text{итог}} = 167327,89 \text{ руб.} \quad (13)$$

Базовая ставка налога на прибыль  $H_{\text{приб}}$  составляет 20 % от изменения себестоимости готовой продукции. Налог на имущество  $H_{\text{им}} = 2,2\%$ . Сумма уплаченных налогов составит:

$$H_{\text{сумма}} = \Delta C_{\text{итог}} \cdot 20\% + \Delta O_{\phi} \cdot 2,2\%. \quad (14)$$

$$H_{\text{сумма}} = 167327,89 \cdot 20\% + 21500 \cdot 2,2\% = 33938 \text{ руб.}$$

Чистая прибыль  $\Pi_t$  определяется по формуле:

$$\Pi_t = \Delta П - H_{\text{сумма}}. \quad (15)$$

$$\Pi_t = 167327,89 - 33938 = 133389,89 \text{ руб.}$$

Рассчитаем коэффициент дисконтирования:

$$\alpha_n = \frac{1}{(1+E)^n}, \quad (16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент дисконтирования;

$n$  – номер шага расчета,  $n=1$ ;

$E$  – норма дисконта,  $E=0,2$ .

$$\alpha_1 = \frac{1}{(1+0,2)^1} = 0,833.$$

Финансовые результаты  $R_t$ , которые достигнуты на  $t$ -м шаге расчета:

$$R_t = \Pi_t + Z_{\text{ам}}. \quad (17)$$

$$R_t = 133389,89 + 1720 = 135109,89 \text{ руб.}$$

Вычислим чистый дисконтированный доход ЧДД ( $\Delta K = \Delta O_{\phi}$ ):

$$\text{ЧДД} = R_t \cdot \alpha_1 - \Delta K \quad (18)$$

$$\text{ЧДД} = 135109,89 \cdot 0,833 - 21500 = 91046 \text{ руб.}$$

Индекс доходности PI определяется по формуле:

$$PI = \frac{1}{\Delta K} \cdot R_t \cdot \alpha_1. \quad (19)$$

$$PI = \frac{1}{21500} \cdot 91046 \cdot 0,833 = 3,5.$$

Срок окупаемости вложений при внедрении технического решения в конструкцию горизонтального лопастного смесителя СГО-4 составляет:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{\Pi_t}. \quad (20)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{21500}{133\,389,89} = 0,2.$$

В таблице 2 представлены основные расчетные показатели экономической целесообразности внедрения стержневых элементов цилиндрической формы в конструкцию лопастного смесителя СГО-4.

Таблица 2 – Результаты экономического расчета обоснования внедрения устройства в конструкцию смесителя

Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Изменение основных фондов	$\Delta O_{\phi}$	руб.	21500
Прибыль за счет снижения себестоимости сырья	$\Delta \Pi$	руб.	167327,89
Текущие затраты на:	$Z_{\text{тек}}$	руб.	5590
- амортизация	$Z_{\text{ам}}$	руб.	1720
- капитальный и текущий ремонт	$Z_{\text{кт.рем.}}$	руб.	3225
- эксплуатацию	$Z_{\text{экспл}}$	руб.	645
Налоги:	$N_{\text{сумма}}$	руб.	33938
- на прибыль	$N_{\text{приб}}$	руб.	33465,58
- на имущество	$N_{\text{им}}$	руб.	473
Чистая прибыль	$\Pi_t$	руб.	133389,89
Коэффициент дисконтирования	$\alpha$	-	0,833
Чистый дисконтированный доход	ЧДД	руб.	91046
Индекс доходности	PI	-	3,5
Срок окупаемости	$T_{\text{ок}}$	лет	0,2

Индекс доходности, полученный в результате расчета, показывает, что предложенная модернизация экономически эффективна ( $PI=3,5>1$ ). Срок окупаемости затраченных средств на внедрение технического решение в виде установки стержневых элементов составил 0,2 года.