

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ В СМЕСИТЕЛЬНО-НАГРЕВАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Лозовая С.Ю., Гуденко О.В.

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

Ключевые слова: смесительно-нагревательное устройство, стержневой рабочий орган, гидродинамическое моделирование, полимер-наполненная смесь, коэффициент загрузки, вторичная переработка, полимерные отходы.

Аннотация. На сегодняшний день повышается спрос на производство полимер-наполненных смесей (песчаных, с керамическим боем с отходами машиностроения, и др.), являющихся результатом вторичной переработки полимерных отходов, которые используются при строительстве домов, отделке зданий, сооружений, благоустройстве парков и др. Качество готовой смеси из расплавленного полимера с наполнителем зависит от смесительно-нагревательного устройства периодического действия и нового вертикального стержневого рабочего органа. Для определения условий смешивания полимер-песчаной смеси построены цифровые двойники для гидродинамического моделирования. При использовании CAD/CAE-системы *SolidWorks* получены модели взаимодействия частиц компонентов смеси с элементами устройства при различных коэффициентах загрузки и числе оборотов рабочего органа. Установлено, что для смешивания расплавленного полимера и песка целесообразно использовать коэффициент загрузки, равный 0,7 и число оборотов рабочего органа 100 мин⁻¹. Уменьшение коэффициента загрузки и увеличение числа оборотов приводит к снижению производительности и увеличению энергозатрат, соответственно.

HYDRODYNAMIC MODELING OF MIXING PROCESSES IN A BATCH MIXING AND HEATING DEVICE

Lozovaya S.Yu., Gudenko O.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: mixing and heating device, core working body, hydrodynamic modeling, polymer-filled mixture, load factor, recycling, polymer waste.

Abstract. Today, there is an increasing demand for the production of polymer-filled mixtures (sand-based, ceramic-based, waste-based, etc.), which are the result of the recycling of polymer waste. These materials are used in the construction of houses, buildings, structures, parks, and other facilities. The quality of the finished mixture of molten polymer and filler depends on the batch mixing and heating device and the new vertical rod working element. Digital twins for hydrodynamic modeling have been constructed to determine the mixing conditions of the polymer-sand mixture. Using the SolidWorks CAD/CAE system, models of the interaction of mixture component particles with the device elements were obtained at various loading factors and rotational speeds of the working organ. It has been established that it is advisable to use a loading factor of 0.7 and a working speed of 100 min⁻¹ for mixing molten polymer and sand. Reducing the load factor and increasing the speed leads to a decrease in productivity and an increase in energy consumption, respectively.

Введение

За 2024 год в России произведено больше 3,2 млн. тонн пластиковых отходов, что больше на 8%, чем в 2023 году [1]. Из-за загрязнения окружающей среды и больших затрат на утилизацию существует потребность во вторичной переработке подобных отходов. На сегодняшний день большой спрос имеют полимер-наполненные смеси (песчаные, с керамическим боем, с отходами машиностроения и др.) [2], но при этом наибольший объем приходится на полимер-песчаные смеси, изделия из которых имеют широкую номенклатуру декоративных и строительных материалов, активно применяющихся при строительстве домов, отделке зданий, сооружений, благоустройстве парков, ландшафтном дизайне и т.д. К ним относятся тротуарная плитка, кровельная черепица, заглубленные смотровые устройства, канализационные люки, парковая мебель, урны, кашпо и др. [1, 2].

Полимер-наполненные смеси включают в себя следующие компоненты: минеральный наполнитель (песок), полимерное связующее (полиэтилен высокого давления и др.), различные добавки (пигменты, инструментальные отходы машиностроения, пластификаторы и др.). Соотношение их по объему песка и полиэтилена изменяются в пределах от 75:25 до 50:50 [3]. Качество полимер-наполненных изделий зависит от следующих характеристик: прочности, эластичности, химической устойчивости, УФ-устойчивости и др. Благодаря этим свойствам существенно повышаются эксплуатационные характеристики изделий. Для обеспечения вышеупомянутых свойств необходимо организовать процесс смешивания совместно с нагревом [4].

Материалы и методы исследований

Анализ оборудования показал [4-6], что для получения полимер-наполненных смесей с заданными характеристиками целесообразно использовать для совместного смешивания с нагревом вертикальный рабочий орган [7], так как, как правило, в классических схемах производства [8] устройства с совместным нагревом и перемешиванием имеют рабочие органы с горизонтальным расположением, что способствует прилипанию и пригоранию связующего к рабочим элементам устройств, а это приводит к снижению качества готовой смеси, увеличению эксплуатационных расходов, повышению энергоемкости процесса. Для устранения указанных недостатков был разработан новый вертикальный стержневой рабочий орган (рис. 1, а) [7], состоящий из трехуровневого каркаса, прикрепленного к приводному валу: на первом уровне на прутке располагаются два стержня; на втором и третьем уровнях каркас имеет квадратную и шестиугольную формы, в углах которых располагаются четыре и шесть стержней, соответственно. Стержни всех уровней имеют одинаковую длину. Такое равномерное расположение стержней по всему объему камеры должно организовать упорядоченные циркуляционные потоки, которые обеспечат равномерные нагрев и смешивание компонентов, препятствующие прилипанию и пригоранию смеси к стержням и стенкам камеры, в том числе и при выгрузке готовой смеси.

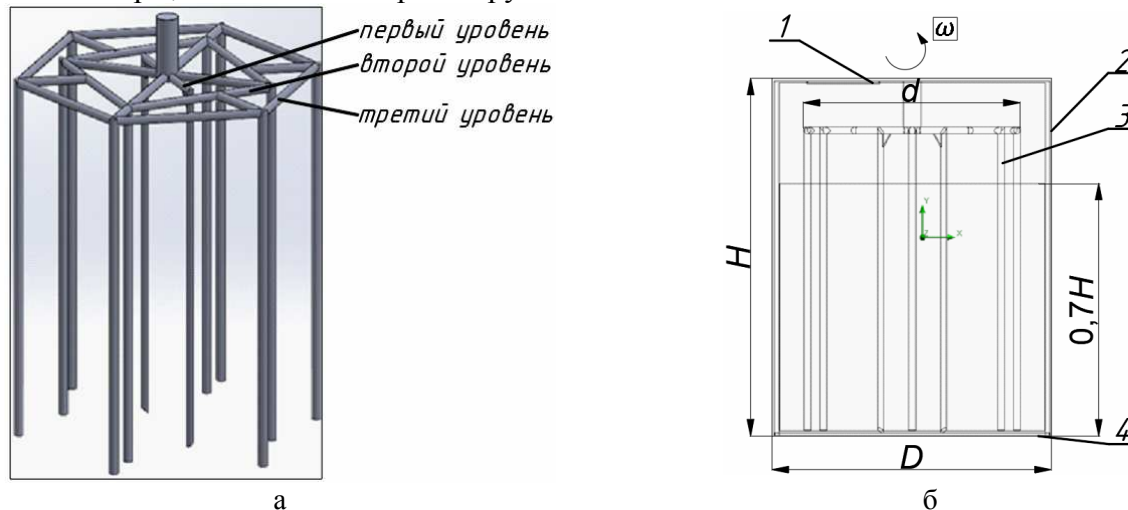


Рис. 1. Вертикальный стержневой рабочий орган: а – цифровой двойник рабочего органа; б – расчетная модель смесительно-нагревательного устройства: 1 – загрузочное отверстие; 2 – смесительная камера; 3 – вертикальный стержневой рабочий орган; 4 – шиберный затвор

При проектировании нового оборудования важное место занимает моделирование процессов, происходящих при его работе. Для этого создается цифровой двойник, наличие которого обеспечивает вариативность исполнения конструкции и позволяет проводить анализ его функциональности, что ускоряет процесс проектирования. Для исследования процесса смешивания новым вертикальным стержневым рабочим органом наиболее целесообразно осуществить гидродинамическое моделирование в программном продукте *SolidWorks Simulation* [9, 10], который позволяет получить траектории потоков смешиваемых компонентов и их скоростей, а также фазовые портреты при работе цифрового двойника.

Для осуществления моделирования построена рабочая модель устройства стержневого рабочего органа в компоновке со смесительной камерой (рис. 1, б). Для выполнения расчетов модель устройства проверяют на отсутствие зазоров и открытых отверстий, при их наличии они удаляются. Затем задаются граничные условия и необходимые параметры, такие как:

- тип задачи – внутренняя, т.е. внутри модели;
- тип жидкости – неньютоновская жидкость [11];
- тип текучей среды – «полимер-песчаная смесь», плотность 1800 кг/м^3 ;
- вязкость: $2,3 \cdot 10^2 \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- температура: 150°C ;
- скорость на входе: 0 м/с ;
- давление окружающей среды: 101325 Па .
- коэффициент загрузки: $0,5; 0,7$;
- число оборотов рабочего органа: $50, 100, 150 \text{ мин}^{-1}$.

В качестве исследуемого материала рассматривается полимер-песчаная смесь, состоящая из минерального наполнителя (песка) – 1 объемная часть и связующего (полимера) – 1 объемная часть. Рабочий цикл системы включает в себя:

- одновременную загрузку компонентов в необходимых пропорциях через загрузочное отверстие в нагретую до температуры 150°C ;
- смешивание компонентов при воздействии вертикального рабочего органа;
- выгрузку готовой смеси через разгрузочное отверстие с шиберным затвором вниз смесительной камеры.

Анализ гидродинамических моделей при различных технологических параметрах работы устройства [12, 13].

А) Коэффициент загрузки $K_z = 0,5$; число оборотов рабочего органа $n = 50 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 2, а); $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 2, б); $n = 150 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 2, в).

Характер перемещения смеси при различных скоростях вращения рабочего органа подобен относительно друг друга. Сразу после загрузки компонентов смеси частицы опускаются по круговым траекториям с минимальной скоростью вдоль двух стержней первого уровня каркаса, образуя воронку (рис. 2, II). При этом потоки смеси, снижаясь ко дну камеры, выбрасываются на периферию, где стержни второго и третьего уровней каркаса разгоняют смесь по круговым траекториям, которая, поднимаясь вверх, образует упорядоченные потоки, вращающиеся против часовой стрелки (рис. 2, I) у стенок и/или в объеме в зависимости от числа оборотов рабочего органа, что не дает комковаться составляющим смеси.

Здесь необходимо отметить, что несмоченные связующим частицы наполнителя, ввиду наличия каркаса рабочего органа, выносятся в пространство выше уровня загрузки, но ниже каркаса, где перемещаясь по вихревым траекториям с течением времени скапливаются в виде области (рис. 2, а, I) или пробок (рис. 2, б, в, I) над упорядоченными потоками (рис. 2, зоны Б). При этом могут создаваться агрегированные комплексы, когда частицы наполнителя снаружи замкнуты связующим. Из областей скопления частицы и агрегированные комплексы также снижаются по круговым траекториям через воронку, создаваемую стержнями первого уровня и вовлекаются в упорядоченные периферийные потоки.

Здесь нужно отметить следующее.

1) При $n = 50 \text{ мин}^{-1}$ в смеси будут встречаться образования в виде агрегированных комплексов наполнителя, потому что в центре в области стержней первого уровня скорость перемещения частиц смеси мала и изменяется в диапазоне $0,2-0,3 \text{ м/с}$ ($V_{cp} = 0,25 \text{ м/с}$), поэтому после загрузки наполнителя и связующего частицы не успевают равномерно перемешиваться, образуя мертвую зону А шириной 50 мм . Максимальная скорость перемещения потоков в пристенной зоне равна $0,3-0,4 \text{ м/с}$ ($V_{cp} = 0,35 \text{ м/с}$), что больше в 1,4 раза, чем в центре. Из-за мертвой зоны А число оборотов $n = 50 \text{ мин}^{-1}$ недостаточно для качественного перемешивания смеси. В связи с ее высокой вязкостью и малым числом оборотов может происходить налипание и пригорание связующего на каркас и верхнюю часть стержней.

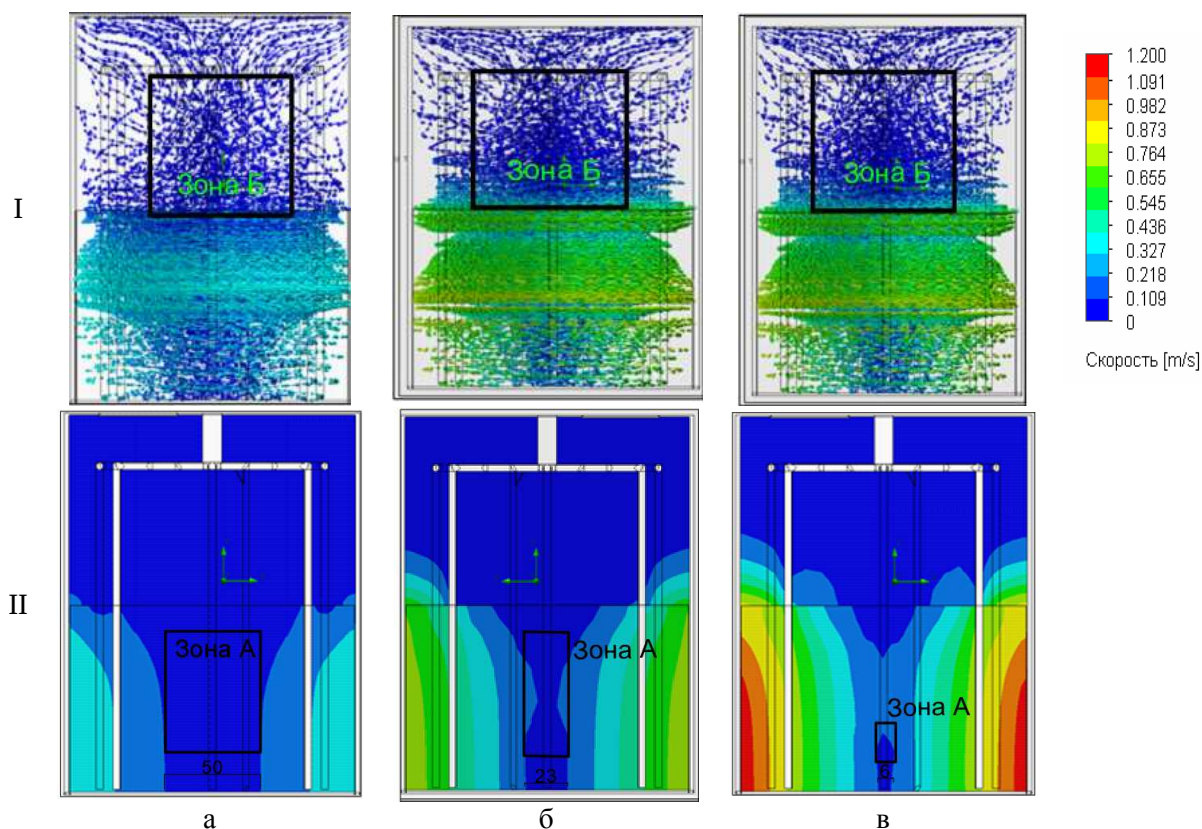


Рис. 2. Гидродинамическая модель смешивания в камере с коэффициентом загрузки $K_z = 0,5$ при различных числах оборотов: а – $n = 50 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 100 \text{ мин}^{-1}$; в – $n = 150 \text{ мин}^{-1}$;
I – траектории перемещения частиц; II – фазовые портреты скоростей

2) При $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ скорость перемещения частиц $V = 0,4-0,6 \text{ м/с}$ ($V_{cp} = 0,5 \text{ м/с}$), при этом ширина зоны А равна 23 мм, что в 2 раза меньше, чем при $n = 50 \text{ мин}^{-1}$. Скорость перемещения частиц в пристенной зоне варьируется в диапазоне 0,6-0,8 м/с ($V_{cp} = 0,7 \text{ м/с}$), что больше в два раза, соответственно;

3) При $n = 150 \text{ мин}^{-1}$ максимальная скорость перемещения частиц в центре камеры у ее стенок увеличивается до 1,2 м/с, что больше в 3,4 раза и в 1,7 раз, чем при $n = 50 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, соответственно. Зона А практически исчезает (ее размер не превышает 6 мм), что не влияет на качество приготавливаемой смеси.

Таким образом, число оборотов $n = 50 \text{ мин}^{-1}$ нецелесообразно использовать, так как образуется мертвая зона А, которая будет способствовать созданию агрегированных комплексов, поэтому в дальнейшем моделирование ее не рассматривается. Также нерационально увеличивать число оборотов до $n = 150 \text{ мин}^{-1}$, поскольку характер перемещения частиц однотипен с $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, а увеличение числа оборотов приводит к увеличению энергозатрат. Так при увеличении числа оборотов в 1,5 раза скорости увеличиваются в 1,7 раз, что несколько ускорит процесс смешивания. Но необходимо учесть, что частота оборотов в формуле расчета мощности привода [6] стоит в третьей степени, поэтому ее повышение в разы увеличивает мощность. При числе оборотов $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ вязкость смеси, являющейся неньютоновской жидкостью, снижается, поэтому отсутствует процесс прилипания и пригорания связующего.

Б) Коэффициент загрузки $K_z = 0,7$; число оборотов рабочего органа $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 3, а) и $n = 150 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 3, б).

При числе оборотов $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ и более $K_z = 0,7$ смеси характер перемещения частиц однотипен. Компоненты смеси задерживаются выше уровня линии загрузки $0,7H$ (где H – высота камеры), а часть смеси опускается по винтовой траектории вниз вдоль стержней первого и второго уровней, благодаря чему смешивание происходит более равномерно по всей высоте камеры. В пристенной зоне частицы разгоняются в той или иной мере стержнями

третьего уровня, при этом скорость движения частиц соответствует скорости вращения стержней. Выше уровня загрузки в обоих случаях имеет место скопление частиц. Это связано с тем, что частицы при подъеме вверх задерживаются каркасом. Также стоит отметить следующее.

– При $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ в пристенной зоне смешение происходит равномерно по всей высоте камеры со скоростью $0,6\text{--}0,8 \text{ м/с}$ ($V_{cp} = 0,7 \text{ м/с}$). Имеется зона А шириной 16 мм с минимальной скоростью движения частиц $0,1\text{--}0,3 \text{ м/с}$ ($V_{cp} = 0,2 \text{ м/с}$). Компоненты смеси распределяются равномерно по всему объему и частицы песка более интенсивно поглощаются расплавленным полимером. Скорость перемещения частиц у стержней второго уровня каркаса составляет $0,4\text{--}0,6 \text{ м/с}$ ($V_{cp} = 0,5 \text{ м/с}$).

– При $n = 150 \text{ мин}^{-1}$ имеет место расслоение смеси по всей высоте камеры. С увеличением числа оборотов рабочего органа потоки поглощенного расплавленным полимером песка собираются в центральной части, а потоки агрегированных комплексов, разделяясь на отдельные слои ввиду увеличения массы, отбрасываются на периферию, образуя слои разной толщины. Несмотря на уменьшение зоны А до 6 мм , что в $2,5$ раза меньше, чем при $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, качество перемешивания смеси будет неоднородным из-за агрегированных комплексов. Скорость движения частиц варьируется в диапазоне $0,4\text{--}0,8 \text{ м/с}$, ($V_{cp} = 0,6 \text{ м/с}$), а у стенок камеры $1\text{--}1,2 \text{ м/с}$ ($V_{cp} = 1,1 \text{ м/с}$).

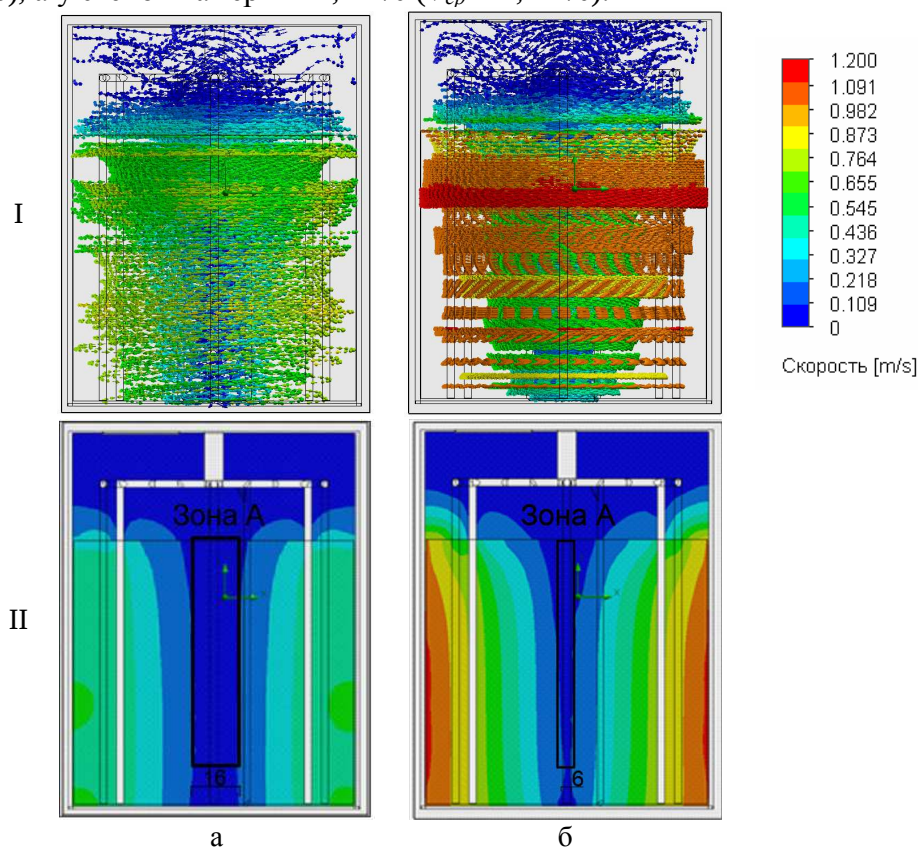


Рис. 3. Гидродинамическая модель смешивания в камере с коэффициентом загрузки $K_z = 0,7$ при различных числах оборотов: а – $n = 100 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 150 \text{ мин}^{-1}$; I – траектории перемещения частиц; II – фазовые портреты скоростей

Анализ показал, что при коэффициенте загрузки $K_z = 0,7$ нецелесообразно увеличение числа оборотов привода рабочего органа до $n = 150 \text{ мин}^{-1}$, так как при таком режиме работы значительно увеличится расслоение смеси по всей высоте камеры из-за образования агрегированных комплексов.

Выводы

1. Установлена номенклатура полимер-наполненных изделий вторичной переработки, для которых наиболее целесообразно использовать полиэтилен высокого давления.

2. Анализ оборудования показал, что для одновременного нагрева и смешивания полимер-наполненных смесей рационально применять смесительно-нагревательное устройство периодического действия с вертикальным рабочим органом, как предполагается, неспособствующим прилипанию и пригоранию смеси к стержням и стенкам камеры ввиду организации циркуляционных потоков во всем объеме камеры, что обеспечивает получение смеси с заданными свойствами.

3. Построены цифровые двойники устройства и вертикального рабочего органа для гидродинамического моделирования процесса смешивания компонентов в программном продукте *SolidWorks Simulation*, заданы граничные условия.

4. Установлено, что число оборотов $n = 50 \text{ мин}^{-1}$ нецелесообразно использовать, так как образуется мертвая зона А, которая будет способствовать созданию агрегированных комплексов. Также нерационально увеличивать число оборотов до $n = 150 \text{ мин}^{-1}$, поскольку характер перемещения частиц однотипен с $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, а увеличение числа оборотов приводит к увеличению энергозатрат. Так при увеличении числа оборотов в 1,5 раза скорости увеличиваются в 1,7 раз, что несколько ускорит процесс смешивания. Но необходимо учесть, что частота оборотов в формуле расчета мощности привода стоит в третьей степени, поэтому ее повышение в разы увеличивает мощность. При числе оборотов $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ вязкость смеси, являющейся неньютоновской жидкостью, снижается, поэтому отсутствует процесс прилипания и пригорания связующего.

5. Определено, что при коэффициенте загрузки $K_3 = 0,7$ нецелесообразно увеличение числа оборотов привода рабочего органа до $n = 150 \text{ мин}^{-1}$, так как при таком режиме работы значительно увеличится расслоение смеси по всей высоте камеры из-за образования агрегированных комплексов.

6. Установлено на основании проведенных исследований что целесообразно использовать коэффициент загрузки $K_3 = 0,7$ и число оборотов $n = 100 \text{ мин}^{-1}$, так как при таком режиме работы устройства обеспечивается организация циркуляционных потоков, что положительно влияет качество смешивания.

Список литературы

1. В России выросло производство вторичного пластика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rg.ru/2024/03/12/biznes-prinimaet-polimery.html>.
2. Надеева И.В., Волченко Е.Ю., Акчурин Т.К., Козлов Ю.Д. Формирование керамического композита при использовании компонентов - продуктов вторичного сырья // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства: материалы II научно-технической конференции, г. Волгоград, 24-25 октября 2009г. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2009. – С. 113-117.
3. Абрамчук А.Д., Христунова А.И., Яблочников С.Л. Анализ отходов, включающих полимерные материалы // Сборник статей II Международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация, инновации, smart-city. Проблемы устойчивого развития, экологии человека и охраны окружающей среды». – М.: Изд-во МТУСИИ, 2024. – С. 131-135.
4. Ляпоков А.В., Сутягин В.М., Лопатинский В.П., Бондалетов В.Г. Основы проектирования и оборудование производств полимеров: Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2025. – 480 с.
5. Патент №2056286 РФ. Установка для приготовления строительной смеси и элемент кровельного покрытия из строительной смеси / Ф.М. Вакильев, Е.Ф. Вакильев, Э.В. Качурин. – Заявка №95111593 от 11.07.1995; опубл. 20.03.1996.
6. Патент №2185959 РФ. Система для изготовления изделий из сыпучих материалов и полимерных отходов / А.П. Болдырев, Л.А. Перешивайлов, Н.В. Хоружий, В.И. Кузнецов. – Заявка №2000129758 от 29.11.2000; опубл. 27.07.2002.
7. Патент №229958 РФ. Установка для получения полимер-наполненной смеси / С.Ю. Лозовая, О.В. Гуденко, С.И. Анциферов. – Заявка №2024121750 от 31.07.2024; опубл. 06.11.2024, Бюл. № 31.
8. Производство полимерпесчаных изделий: оборудование, технологии и перспективы: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rcycle.net/plastmassy/izdeliya-iz-vtorichnogo-plastika/polimerpeschanye-izdeliya/proizvodstvo-tehnologii-oborudovanie>.
9. Конев А.Ю., Глазков А.Ю., Хольшев Н.В., Прохоров А.В., Ведищев С.М. Методика и результаты моделирования в «FLOW SIMULATION» «SOLIDWORKS 2018» процесса обтекания лопатки смесителя кормов // Наука в центральной России. – 2023. – №6. – С. 93-101.
10. Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., Шемелова О.В. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в каналах сложной конфигурации с помощью программного модуля SOLIDWORKS FLOW SIMULATION // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №14. – С. 199-201.

11. Шульман З.П., Берковский Б.М. Пограничный слой неньютоновских жидкостей. – Минск: Наука и техника, 1996. – 238 с.
12. Лозовая С.Ю., Лозовой Н.М., Анциферов С.И., Гуденко О.В. Исследование процессов смешивания в гидросмесителе с новым рабочим органом для производства качественных кладочных растворов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – №4. – С. 3-11.
13. Капранова А.Б., Бакин М.Н., Верлока И.И., Зайцев А.И. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабан // Вестник ТГТУ. – 2015. – Т. 21, №2. – С. 296-304.

References

1. Russia has increased its production of recycled plastic [Electronic resource]. – Access mode: <https://rg.ru/2024/03/12/biznes-prinimaet-polimery.html>.
2. Nadeeva I.V., Volchenko E.Yu., Akchurin T.K., Kozlov Yu.D. Formation of a ceramic composite using components - products of secondary raw materials // Engineering problems of building materials science, geotechnical and road construction : materials of the II Scientific and Technical Conference, Volgograd, October 24-25, 2009. – Volgograd: VolgSCIU Publ. house, 2009. – P. 113-117.
3. Abramchuk A.D., Khristunova A.I., Yablochnikov S.L. Analysis of Waste Containing Polymer Materials // Collection of Articles from the II International Scientific and Practical Conference "Digital Transformation, Innovations, and Smart-City. Challenges in Sustainable Development, Human Ecology, and Environmental Protection". – М.: MTUSiI Publ. house, 2024. – P. 131-135.
4. Lyapokov A.V., Sutyagin V.M., Lopatinsky V.P., Bondaleto V.G. Fundamentals of Polymer Production Design and Equipment: Textbook. – SPb.: Lan, 2025. – 480 p.
5. Patent No. 2056286 RU. Installation for Preparing a Construction Mixture and a Roofing Element Made of a Construction Mixture / F.M. Vakilyev, E.F. Vakilyev, E.V. Kachurin. – Appl. No. 95111593 from 11.07.1995; publ. 20.03.1996.
6. Patent No. 2185959 RU. System for Manufacturing Products from Bulk Materials and Polymer Waste / A.P. Boldyrev, L.A. Pereshivailov, N.V. Khoruzhiy, V.I. Kuznetsov. – Appl. No. 2000129758 from 29.11.2000; publ. 27.07.2002.
7. Patent No. 229958 RU. Installation for Producing a Polymer-Filled Mixture / S.Yu. Lozovaya, O.V. Gudenko, S.I. Antsiferov. – Appl. No. 2024121750 from 31.07.2024; publ. 06.11.2024, Bulletin No. 31.
8. Production of Polymer-Sand Products: Equipment, Technologies, and Prospects: [Electronic resource]. – Access mode: <https://rcycle.net/plastmassy/izdeliya-iz-vtorichnogo-plastika/polimerpeschanye-izdeliya/proizvodstvo-tehnologii-oborudovanie>.
9. Konev A.Yu., Glazkov A.Yu., Kholshhev N.V., Prokhorov A.V., Vedishchev S.M. Methodology and Results of Modeling the Flow Around a Feed Mixer Blade in "FLOW SIMULATION" "SOLIDWORKS 2018" // Science in Central Russia. 2023, no. 6, pp. 93-101.
10. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Shemelova O.V. Modeling of Hydrodynamics and Heat Transfer Processes in Complex-Configured Channels Using the SOLIDWORKS FLOW SIMULATION Software Module // Bulletin of Kazan Technological University. 2014, no. 14, pp. 199-201.
11. Shulman Z.P., Berkovsky B.M. Boundary Layer of Non-Newtonian Fluids. – Minsk: Science and technology, 1996. – 238 p.
12. Lozovaya S.Yu., Lozovoy N.M., Antsiferov S.I., Gudenko O.V. Research of mixing processes in a hydraulic mixer with a new working body for the production of high-quality masonry solutions // News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. 2025, no. 4, pp. 3-11.
13. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zaitsev A.I. Methods of describing the motion of solid dispersed media in various planes for the cross-sections of the mixing drum // Bulletin of TSTU. 2015, vol. 21, no. 2, pp. 296-304.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Лозовая Светлана Юрьевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механического оборудования	Lozovaya Svetlana Yurievna – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of mechanical equipment
Гуденко Олег Витальевич – аспирант	Gudenko Oleg Vitalievich – postgraduate student
lozwa@mail.ru	

Получена 09.12.2025