Чемеричко Г.И., Качаев А.Е. Теоретическое обоснование режимов работы дезинтегратора для смешивания дисперсных компонентов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026. – № 40. – С. 70-78.

УДК 621.929 https://doi.org/10.26160/2658-3305-2026-40-70-78

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДЕЗИНТЕГРАТОРА ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Чемеричко Г.И.[1], Качаев А.Е.[2]

[1]Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород;
[2]Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна

Ключевые слова: дезинтегратор, встречное вращение роторов, кинетика формирования однородности смеси, интенсивность смешивания, энергетический критерий разрушения частиц, накопленное повреждение частиц, сохранение гранулометрического состава.

Аннотация. В статье исследования представлено теоретическое обоснование режимов работы дезинтегратора при смешивании дисперсных компонентов с ограничением нежелательного измельчения частиц. Рассмотрена расчетная схема аппарата со встречным вращением роторов и последовательным прохождением материала через рабочие зоны. Для описания процесса объединены кинетическая модель формирования однородности смеси, кинематическое представление движения частиц, энергетический критерий и модель накопленного повреждения. Степень однородности рассматривается как функция продолжительности обработки и интенсивности смешивания, зависящей от частоты вращения роторов. Энергетическое состояние частиц оценивается путем сопоставления их кинетической энергии с принятой критической энергией разрушения. Для учета повторных ударных воздействий введено характерное время накопления повреждения. Проведен параметрический расчетный анализ влияния режимных и физико-механических факторов на однородность смеси, энергетическую нагруженность и устойчивость частиц к разрушению. Расчетами показано, что повышение частоты вращения ускоряет достижение требуемой однородности, но одновременно увеличивает энергетическую нагрузку и сокращает временной запас до развития повреждения. Установлена область рациональных режимов, определяемая совместным выполнением требований к качеству смешивания и сохранению гранулометрического состава. Предложенный подход предназначен для предварительного выбора режимных параметров и последующей экспериментальной проверки. Модель может быть использована при настройке оборудования под свойства конкретного исходного материала.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF OPERATING MODES FOR A DISINTEGRATOR USED TO MIX DISPERSE COMPONENTS

Cherichko G.I.[1], Kachaev A.E.[2]

[1]Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov, Belgorod;
[2]All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems “Raduga”, Kolomna

Keywords: isintegrator, counter-rotation of rotors, kinetics of mixture homogeneity formation, mixing intensity, energy criterion for particle breakage, cumulative particle damage, preservation of particle size distribution.

Abstract. The paper presents a theoretical justification of disintegrator operating modes for mixing dispersed components while limiting undesirable particle grinding. A calculation scheme with counter-rotating rotors and sequential material passage through working zones is considered. The process description combines a kinetic model of mixture homogeneity formation, a kinematic representation of particle motion, an energy criterion, and a cumulative damage model. Homogeneity is treated as a function of processing time and mixing intensity dependent on rotor speed. The energy state of particles is evaluated by comparing their kinetic energy with an adopted critical fracture energy. A characteristic damage accumulation time is introduced to account for repeated impact interactions. A parametric computational analysis of factors affecting mixture homogeneity, energy loading, and resistance to breakage is performed. The calculations show that increasing rotor speed accelerates attainment of homogeneity but simultaneously increases energy loading and reduces the time margin before damage develops. A rational region is identified by jointly satisfying mixing-quality and particle-size-preservation requirements. The approach is intended for preliminary mode selection and experimental verification.

Введение. Получение однородных смесей дисперсных материалов является важной технологической задачей при производстве строительных материалов, сухих строительных смесей и других многокомпонентных систем. Эффективность процесса определяется не только достигаемой однородностью, но и продолжительностью обработки, энергозатратами и сохранением исходных свойств компонентов. Для материалов с заданным распределением частиц по размерам особое значение имеет организация интенсивного смешивания без дополнительного измельчения.

В качестве конструктивной предпосылки может рассматриваться дезинтегратор со встречным вращением роторов и многорядным размещением ударных элементов. Подобные аппараты предназначены для интенсивного механического воздействия и могут использоваться как для измельчения, так и для смешения материалов [1-3]. Применительно к задаче смешивания принципиальным становится не максимальное энергетическое воздействие, а выбор режима, при котором перераспределение компонентов протекает интенсивно, но изменение гранулометрического состава ограничено.

Современные исследования дисперсных сред направлены на описание движения отдельных частиц, сегрегации и количественную оценку качества смешивания [4]. P.B. Umbanhowar, R.M. Lueptow и J.M. Ottino показали, что результат формирования гранулярной смеси определяется совместным действием переноса, диффузионного перемешивания и сегрегации [5]. P. Bhalode и M. Ierapetritou систематизировали индексы однородности и подчеркнули необходимость выбора показателя смешивания с учетом конкретной технологической задачи [6]. M.A. Behjani с соавторами продемонстрировали возможности дискретного метода (DEM – Discrete Element Method) для количественного анализа перемещения и смешивания порошковых материалов [7].

В отечественных исследованиях И.А. Семикопенко с соавторами [1, 8] получены аналитические зависимости, описывающие предварительное смешение и движение частиц в рабочей камере дезинтегратора. А.Е. Качаев с соавторами развили математическое описание центробежного двухфазного потока и кинематических характеристик частиц [9, 10]. Е.Г. Пахомов с соавторами рассмотрели совершенствование смесительного оборудования для сухих строительных смесей [11]. Одновременно современные исследования разрушения частиц показывают существенную роль энергии удара и накопления повреждений [12, 13].

Анализ публикаций показывает наличие противоречия: повышение частоты вращения рабочих органов ускоряет перераспределение компонентов, но одновременно увеличивает кинетическую энергию частиц и вероятность их разрушения. Поэтому для использования дезинтегратора [3] как высокоинтенсивного смесителя требуется определить область режимов, обеспечивающую требуемую однородность при ограничении энергетического воздействия.

Целью исследования является теоретическое обоснование рациональных режимов работы дезинтегратора при смешивании дисперсных компонентов путем установления взаимосвязи между частотой вращения роторов, продолжительностью смешивания, степенью однородности смеси и энергетическим воздействием на частицы, а также определение условий, обеспечивающих достижение требуемой однородности при ограничении изменения гранулометрического состава.

Научная новизна заключается в формировании критериального расчетного подхода к выбору режима дезинтегратора, объединяющего кинетику формирования однородности смеси, энергетический критерий Ψ и модель накопленного повреждения. В отличие от раздельного рассмотрения смешивания и разрушения, рациональный режим определяется как область одновременного выполнения ограничений по качеству смеси и энергетической нагруженности частиц.

Практическая значимость работы Практическая значимость состоит в возможности предварительного определения диапазона частот вращения и времени обработки, подлежащего экспериментальной проверке. После идентификации коэффициента интенсивности смешивания, эффективной критической энергии и параметров накопленного

повреждения модель может использоваться для настройки дезинтегратора под конкретный материал и сокращения объема натурного поиска режимов.

Объекты, материалы и методы исследования. Объектом исследования является процесс смешивания дисперсных компонентов в рабочей камере дезинтегратора [3] с вращающимися рабочими органами. Рассматривается режим работы агрегата, при котором основным технологическим результатом является перераспределение частиц компонентов и формирование однородной смеси без целенаправленного измельчения исходного материала.

Предмет исследования составляют закономерности влияния частоты вращения роторов, продолжительности обработки, геометрических параметров рабочей зоны и физико-механических характеристик частиц на степень однородности смеси и энергетическую нагруженность дисперсного материала.

В качестве расчетной схемы принят дезинтегратор [3] со встречным вращением роторов и последовательным прохождением материала через рабочие зоны агрегата. Движение частицы рассматривается в первом приближении как движение со скоростью, определяемой угловой скоростью ротора и радиусом ее положения в помольной камере.

Для описания процесса смешивания в дезинтеграторе [3] введена 0,степень однородности H, изменяющаяся в пределах $0 \le H \le 1$. Кинетику формирования смеси представим дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dH}{dt} = k_m \cdot (1 - H), \tag{1}$$

где t – продолжительность смешивания, c; k_m – эффективный коэффициент интенсивности смешивания, $с^{-1}$.

Решение уравнения (1) при $H(0) = 0$ имеет вид:

$$H(t) = 1 - e^{-k_m \cdot t}. \tag{2}$$

Для параметрического исследования влияние частоты вращения n на интенсивность смешивания в мельнице представим зависимостью:

$$k_m(n) = k_0 \left(\frac{n_i}{n_0} \right)^q, \tag{3}$$

где k_0 – значение коэффициента смешивания при опорной частоте n_0; q – эмпирический показатель, характеризующий чувствительность процесса смешивания к изменению частоты вращения n_i.

Зависимость (3) использовалась, как расчетное допущение и при практическом применении была идентифицирована по экспериментальным данным.

Требуемое время достижения заданной степени однородности определяли по выражению:

$$t_{треб} = -\ln \frac{1 - H_{треб}}{k_m}, \tag{4}$$

где $H_{треб}$ – требуемое значение однородности смеси, $H_{треб} = 0{,}9$.

Для оценки энергетического воздействия на материал частица представлялась эквивалентной сферой диаметром d_p. Ее объем и масса определялись по известным выражениям:

$$V_p = \pi d_p^3 / 6, \tag{5}$$

$$m_p = \rho_p V_p, \tag{6}$$

где ρ_p – плотность материала частицы, $кг/м^3$.

Кинетическая энергия частицы рассчитывалась по выражению:

$$E_к = \frac{m_p \vartheta_p^2}{2}, \tag{7}$$

где ϑ_p – скорость частицы в помольной камере дезинтегратора, м/с.

Критическая энергия, соответствующая принятому уровню разрушения частицы, в инженерной постановке задавалась зависимостью:

$$E_{cr} = K_f \cdot V_p, \tag{8}$$

где K_f – удельная критическая энергия разрушения, Дж/м³.

Для сопоставления фактического энергетического воздействия с критическим уровнем использовался безразмерный энергетический критерий:

$$\psi = \frac{E_к}{E_{cr}}. \tag{9}$$

После подстановки величин массы (5) и объема (6) эквивалентной сферической частицы диаметром d_p получаем выражение:

$$\psi = \frac{\rho_p V_p^2}{2K_f}. \tag{10}$$

В рамках принятой модели условие $\Psi < 1$ рассматривалось как расчетное энергетическое ограничение режима смешения, направленного на сохранение гранулометрического состава материала. При $\Psi \geq 1$ режим рассматривался как потенциально измельчительный, связанный с повышенным риском разрушения частиц.

Следует отметить, что при принятой зависимости (8) геометрический размер эквивалентной сферической частицы d_p сокращается из выражения (10) для Ψ. Поэтому непосредственное влияние диаметра частиц d_p на вероятность разрушения должно учитываться посредством размерно-зависимых параметров прочности или отдельной экспериментально идентифицированной модели разрушения.

Для учета повторных взаимодействий частиц с рабочими элементами мельницы применена модель накопленного повреждения [14]:

$$P_s(t) = e^{-\nu \cdot t \cdot \psi^m}, \tag{14}$$

где P_s – условная вероятность сохранения частицы; v – эффективная частота повреждающих взаимодействий, с$^{-1}$; m – показатель чувствительности процесса разрушения к энергетическому воздействию.

Модель накопленного повреждения описывает постепенное увеличение вероятности разрушения частицы в результате многократных ударных взаимодействий в рабочей камере дезинтегратора и позволяет учитывать влияние не только энергии отдельного столкновения, но и продолжительности обработки и частоты повторных воздействий.

При принятии условного предельного уровня накопленного повреждения $v \cdot t \cdot \Psi^m = 1$ характерное расчетное время до достижения данного уровня определялось по выражению:

$$t_{изм} = \frac{1}{\nu \cdot \psi^m}. \tag{15}$$

Величина $t_{изм}$ в настоящем исследовании рассматривалась как расчетная характеристика модели накопленного повреждения, а не как экспериментально установленное время разрушения отдельной частицы.

Рациональный режим смешивания определялся совместным выполнением следующих условий:

$$\begin{cases} H(t) \geq H_{треб}, \\ \psi \prec 1, \\ t_{треб} \prec t_{изм}, \\ t_{треб} \prec t_{\max}. \end{cases} \tag{16}$$

где $t_{\max}$ – технологически допустимая продолжительность смешивания, с.

Для проведения параметрического вычислительного исследования в качестве базового расчетного сценария были приняты следующие значения: n_0 = 1000 мин$^{-1}$; k_0 = 0,15 с$^{-1}$; q = 1; $H_{треб}$ = 0,90; $t_{\max}$ = 20 с; ρ_p = 2500 кг/м³; R = 0,15 м; K_f = 2 МДж/м³; ν = 0,20 с$^{-1}$; m = 1.

Приведенные значения k_0, q, K_f, v и m являются модельными параметрами вычислительного эксперимента и используются для исследования структуры математической модели и выявления характерных закономерностей. Их численные значения не следует интерпретировать как экспериментально определенные характеристики конкретного материала.

Расчетные исследования выполнялись путем последовательного изменения частоты вращения роторов (наружного n_1 и внутреннего n_2) и определения для каждого режима коэффициента интенсивности смешивания, требуемого времени достижения заданной однородности, энергетического критерия и характерного времени накопления повреждения. На основании полученных данных строились зависимости $H(t,n_i)$, $\Psi(n_i)$, $t_{треб}(n_i)$, $t_{изм}(n_i)$, а также определялись границы области режимов, удовлетворяющих принятой системе ограничений.

Фактическое сохранение гранулометрического состава при последующей экспериментальной проверке модели подтверждалось сравнением распределения частиц по размерам до и после обработки и соответствовать равенству в пределах установленной погрешности метода гранулометрического анализа:

$$f(d_p,t) \approx f(d_p,0). \qquad (17)$$

Таким образом, применяемая методика представляет собой последовательное объединение кинетической модели смешивания, кинематического описания движения частиц, энергетического критерия и модели накопленного повреждения, что позволяет перейти от отдельной оценки частоты вращения дезинтегратора к определению области рациональных режимов его работы.

Основная часть. Кинетика смешивания в дезинтеграторе определяет степень однородности смеси, без учета износа рабочих элементов [15]. При увеличении k_m требуемая однородность достигается за меньшее время. Для дезинтегратора величина k_m в общем случае зависит от частоты вращения, конструкции рабочих элементов, расхода материала и свойств смешиваемых компонентов. В исследовании использовалась одинаковая величина частот вращения для обоих роторов ($n_1 = n_2 = n$). На рисунке 1 показан график зависимости величины степени однородности смеси H в зависимости от времени смешивания $t_{см}$ при различных частотах вращения роторов n в представленном диапазоне.

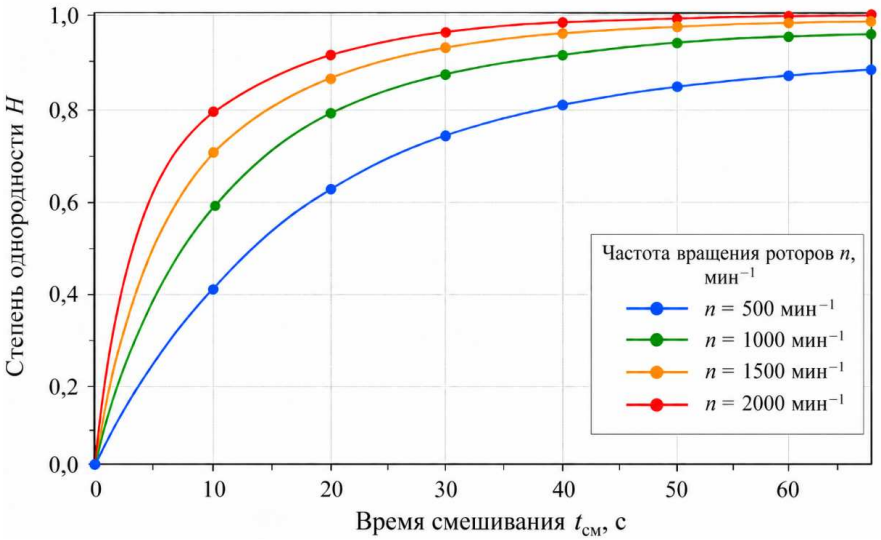


Рис. 1 Расчетная зависимость степени однородности смеси от времени при различных частотах вращения роторов

Из расчетных кривых на рисунке 1 следует, что повышение частоты вращения n ускоряет приближение H к предельному значению. Однако дальнейшее повышение скорости роторов n не может оцениваться только положительно, поскольку одновременно возрастает энергетическая нагрузка на частицы.

На рисунке 2 показан график нелинейного роста энергетического критерия Ψ с увеличением частоты вращения n. Пересечение расчетной кривой с уровнем Ψ = 1 определяет предельную частоту для принятого набора параметров модели. Для реального материала положение этой границы должно уточняться по его физико-механическим характеристикам.

На рисунке 3 показана графике расчетная зависимость времени до измельчения частиц $t_{изм}$ от частоты вращения роторов n для частиц различного размера d_p.

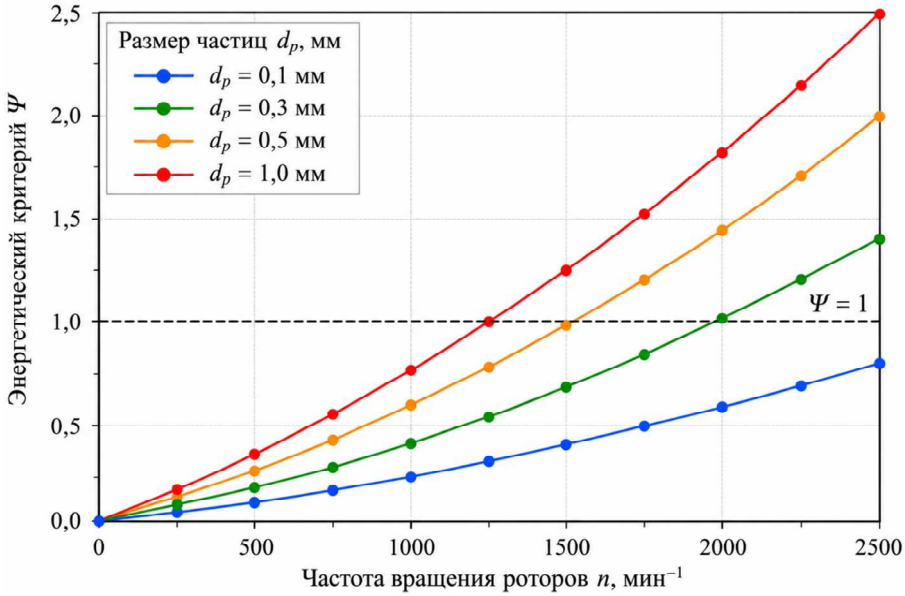


Рис. 2 Расчетная зависимость энергетического критерия Ψ от частоты вращения роторов n

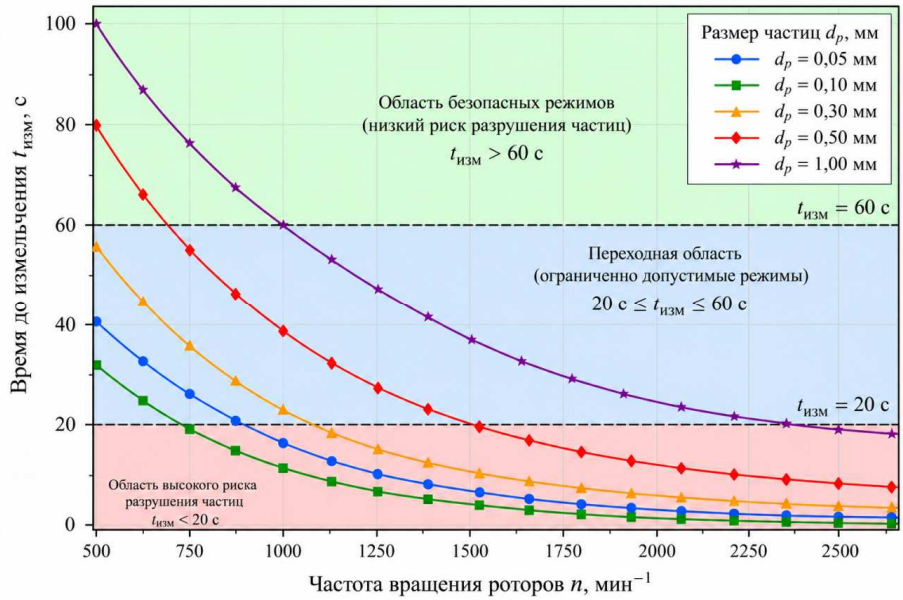


Рис. 3 Расчетная зависимость условного времени $t_{изм}$ до разрушения частиц от частоты вращения роторов n

Результаты и их обсуждение. Проведенный расчетный анализ показывает наличие двух противоположно направленных эффектов. С одной стороны, повышение частоты вращения роторов увеличивает интенсивность движения частиц и сокращает время достижения требуемой однородности. С другой стороны, при увеличении скорости возрастает энергетический критерий Ψ и уменьшается условный временной запас до разрушения. Следовательно, максимальная частота вращения не является автоматически оптимальным режимом смешивания.

Рациональная область определяется пересечением условий по качеству смешивания и сохранению частиц. Нижняя граница частоты вращения задается требованием достижения

$H_{треб}$ за технологически допустимое время. Верхняя граница связана с условием $\Psi < 1$ и необходимостью сохранения достаточного временного запаса $t_{изм}$. При изменении размера, плотности, прочности и формы частиц границы области смещаются, поэтому универсальная частота вращения для всех материалов отсутствует.

Практическая ценность предлагаемого подхода состоит в возможности предварительно сузить диапазон режимов для экспериментальной проверки. После идентификации k_m и параметров разрушения по конкретному материалу модель может использоваться для выбора частоты вращения роторов и продолжительности обработки.

При продолжительности смешивания $t_{см} = 10$ с расчетная степень однородности составляет соответственно 0,528; 0,777; 0,895 и 0,950 для частот 500, 1000, 1500 и 2000 мин$^{-1}$. При увеличении продолжительности обработки до 20 с значения H достигают 0,777; 0,950; 0,989 и 0,998 соответственно.

Расчетное время достижения требуемой однородности $H_{треб} = 0{,}90$ уменьшается с 30,70 с при $n = 500$ мин$^{-1}$ до 15,35 с при 1000 мин$^{-1}$, 10,23 с при 1500 мин$^{-1}$ и 7,68 с при 2000 мин$^{-1}$. Из условия $t_{треб} \le 20$ с расчетная нижняя граница частоты вращения составляет приблизительно $n_{\min} = 768$ мин$^{-1}$.

При $n = 750$ мин$^{-1}$ требуемое время смешивания равно 20,47 с, то есть превышает принятое ограничение 20 с.

Энергетический критерий Ψ при $K_f = 2$ МДж/м^3 возрастает квадратично с частотой вращения. При $n = 750$ мин$^{-1}$ он составляет 0,087, при 1000 мин$^{-1}$ – 0,154, при 1500 мин$^{-1}$ – 0,347, при 2000 мин$^{-1}$ – 0,617, при 2100 мин$^{-1}$ – 0,680 и при 2500 мин$^{-1}$ – 0,964.

Условию $\Psi = 1$ для принятых значений ρ_p, R и K_f соответствует частота вращения около $n_{кр} = 2547$ мин$^{-1}$. При частотах ниже указанного значения выполняется расчетное энергетическое условие $\Psi < 1$.

При учете повторных взаимодействий характерное время накопленного повреждения $t_{изм}$ уменьшается с ростом частоты вращения n. Для $n = 750$ мин$^{-1}$ расчетное значение составляет 57,64 с, при 1000 мин$^{-1}$ – 32,42 с, при 1500 мин$^{-1}$ – 14,41 с, при 2000 мин$^{-1}$ – 8,11 с, при 2100 мин$^{-1}$ – 7,35 с и при 2500 мин$^{-1}$ – 5,19 с.

При $n = 2000$ мин$^{-1}$ время достижения $H = 0{,}90$ составляет 7,68 с, а характерное время накопленного повреждения – 8,11 с. При $n = 2100$ мин$^{-1}$ соответствующие значения составляют 7,31 и 7,35 с. Расчетное пересечение зависимостей $t_{треб}(n)$ и $t_{изм}(n)$ происходит при частоте около $n = 1712$ мин$^{-1}$, при которой обе величины составляют около 7,3 с.

Для рассматриваемого расчетного сценария диапазон частот, удовлетворяющий одновременно условиям $H \ge 0{,}90$, $t_{треб} \le 20$ с и $t_{треб} < t_{изм}$, находится ориентировочно в интервале $768 < n < 2112$ мин$^{-1}$.

Основные расчетные значения приведены в таблице 1. Приведенные численные значения относятся к принятому модельному набору параметров и используются для количественного анализа разработанной математической модели.

Табл. 1. Расчетные параметры исследуемых режимов

n, мин$^{-1}$	k_m, с$^{-1}$	$t_{треб}$, с	Ψ	$t_{изм}$, с
750	0,112	20,47	0,087	57,64
1000	0,150	15,35	0,154	32,42
1500	0,225	10,23	0,347	14,41
2000	0,300	7,68	0,617	8,11
2100	0,315	7,31	0,680	7,35
2500	0,375	6,14	0,964	5,19

Выводы. Разработан расчетно-теоретический подход к обоснованию режимов работы дезинтегратора при смешивании дисперсных компонентов, основанный на совместном рассмотрении кинетики формирования однородности смеси, кинематических характеристик движения частиц и энергетического воздействия на материал.

Установлено, что увеличение частоты вращения роторов n приводит к сокращению времени достижения требуемой степени однородности.

Разработан энергетический критерий Ψ, позволяющий сопоставлять кинетическую энергию частицы с принятой критической энергией разрушения.

Выявлено, что энергетический критерий Ψ возрастает пропорционально квадрату скорости частицы ϑ_p и существенно увеличивается при росте частоты вращения роторов n.

Предложено учитывать повторные воздействия на частицы посредством модели накопленного повреждения.

Подтверждено расчетами, что увеличение частоты вращения n одновременно сокращает время достижения требуемой однородности H и уменьшает расчетное время $t_{изм}$ до достижения принятого уровня накопленного повреждения.

Выявлено, что расчетное пересечение зависимостей $t_{треб}(n)$ и $t_{изм}(n)$ происходит при частоте около 2112 мин$^{-1}$, при которой обе величины составляют приблизительно 7,3 с.

Установлена нижняя расчетная граница частоты вращения, определяемая условием достижения $H_{треб}$ = 0,90 за время не более 20 с.

Список литературы

1. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Салихов Д.Д., Семикопенко Д.И. Теоретическое исследование процесса смешения компонентов в центробежной противоточной мельнице // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2024. – №4. – С. 33-35. – doi.org/10.46418/2619-0729_2024_4_6.
2. Патент №2802949 РФ. Дезинтегратор / И.А. Семикопенко, А.Н. Дегтярь, Д.И. Семикопенко, А.М. Акупиян. – Заявка №2023116834 от 27.06.2023; опубл. 05.09.2023; Бюл. № 25.
3. Патент №2377070 РФ. Дезинтегратор / А.М. Гридчин, В.С. Севостьянов, Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, М.В. Севостьянов, А.Е. Качаев, Н.В. Солопов, Н.И. Алфимова – Заявка №2008118079 от 06.05.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. №36.
4. Качаев А.Е., Севостьянов В.С. Расчёт траектории и скорости движения частицы измельчаемого материала по поверхности рабочего элемента дезинтегратора // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – №2. – С. 56-59.
5. Umbanhowar P.B., Lueptow R.M., Ottino J.M. Modeling Segregation in Granular Flows // Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2019, vol. 10, pp. 129-153. doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030122.
6. Bhalode P., Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations // Powder Technology. 2020, vol. 373, pp. 195-209. doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.043.
7. Alizadeh Behjani M., Ghaffari Motlagh Y., Bayly A.E., Hassanpour A. Assessment of blending performance of pharmaceutical powder mixtures in a continuous mixer using Discrete Element Method (DEM) // Powder Technology. 2020, vol. 366, pp. 73-81. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.102.
8. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Трофимов И.О., Ченцов А.Е. Теоретическое исследование процесса предварительного смешения в камере помола дезинтегратора // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – №7. – С. 98-102.
9. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Севостьянов В.С., Чемеричко Г.И. Исследования производительности дезинтегратора с внутренним рециклом материалов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы конференции. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 151-159.
10. Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Чемеричко Г.И., Орехова Т.Н. Математическое описание динамики центробежного двухфазного потока в помольной камере дезинтегратора // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – №2. – С. 70-79. – doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-2-70-79.
11. Пахомов Е.Г., Романович А.А., Романович М.А., Дядин М.О. Энергосберегающий смеситель для приготовления сухих строительных смесей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – №3. – С. 107-115. – doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-107-115.
12. Uzi A., Levy A. Energy absorption in particle breakage under impact load // Powder Technology. 2021, vol. 377, pp. 308-323. doi.org/ 10.1016/j.powtec.2020.08.061.
13. Denzel M., Prenner M., Sifferlinger N.A. Evaluation of Mixing Effects and Particle Breakage on a Cross Flow Turbine with DEM // BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 2024, vol. 169. pp. 211-220. doi.org/10.1007/s00501-024-01442-y.
14. Баяндин Ю.В., Головин М.С., Банников М.В., Уваров С.В.. Модель накопления повреждений в ортотропном композиционном материале // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Т. 17, №1. – С. 44-59. – doi.org/10.7242/1999-6691/2024.17.1.5.

15. Качаев А.Е., Чемеричко Г.И., Севостьянов В.С. Экспериментальные исследования по повышению абразивной износостойкости пальцев дезинтегратора // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – №1. – С. 112-121. – doi.org/10.34031/2071-7318-2023-9-1-112-121.

References

1. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Salikhov D.D., Semikopenko D.I. Theoretical study of the component mixing process in a centrifugal counter-flow mill // Bulletin of Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Series 4: Industrial Technologies. 2024, no. 4, pp. 33-35. doi.org/10.46418/2619-0729_2024_4_6.
2. Patent No. 2802949 RU. Disintegrator / I.A. Semikopenko, A.N. Degtyar, D.I. Semikopenko, A.M. Akupiyan. – Appl. No. 2023116834 from 27.06.2023; publ. 05.09.2023, Bull. No. 25.
3. Patent No. 2377070 RU. Disintegrator / A.M. Gridchin, V.S. Sevostyanov, R.V. Lesovik, E.S. Glagolev, M.V. Sevostyanov, A.E. Kachaev, N.V. Solopov, N.I. Alfimova– Appl. No. 2008118079/03 from 05.06.2008; publ. 27.12.2009, Bull. No. 36.
4. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S. Calculation of the trajectory and velocity of a particle of material being ground along the surface of a disintegrator working element // Bulletin of Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2012, no. 2, pp. 56-59.
5. Umbanhowar P.B., Lueptow R.M., Ottino J.M. Modeling Segregation in Granular Flows // Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2019, vol. 10, pp. 129-153. doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060718-030122.
6. Bhalode P., Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations // Powder Technology. 2020, vol. 373, pp. 195-209. doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.043.
7. Alizadeh Behjani M., Ghaffari Motlagh Y., Bayly A.E., Hassanpour A. Assessment of blending performance of pharmaceutical powder mixtures in a continuous mixer using Discrete Element Method (DEM) // Powder Technology. 2020, vol. 366, pp. 73-81. doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.102.
8. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Trofimov I.O., Chentsov A.E. Theoretical study of the preliminary mixing process in the grinding chamber of a disintegrator // Bulletin of Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2016, no. 7, pp. 98-102.
9. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Sevostyanov V.S., Chemerichko G.I. Investigation of the performance of a disintegrator with internal material recycling // Energy- and Resource-Saving Technologies and Equipment in the Road and Construction Industries: Conference proceedings. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2021. – P. 151-159.
10. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S., Chemerichko G.I., Orekhova T.N. Mathematical description of the dynamics of a centrifugal two-phase flow in the grinding chamber of a disintegrator // Bulletin of Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2024, no. 2, pp. 70-79. doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-2-70-79.
11. Pakhomov E.G., Romanovich A.A., Romanovich M.A., Dyadin M.O. Energy-saving mixer for the preparation of dry construction mixtures // Bulletin of Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2024, no. 3, pp. 107-115. doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-3-107-115.
12. Uzi A., Levy A. Energy absorption in particle breakage under impact load // Powder Technology. 2021, vol. 377, pp. 308-323. doi.org/ 10.1016/j.powtec.2020.08.061.
13. Denzel M., Prenner M., Sifferlinger N.A. Evaluation of Mixing Effects and Particle Breakage on a Cross Flow Turbine with DEM // BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 2024, vol. 169. pp. 211-220. doi.org/10.1007/s00501-024-01442-y.
14. Bayandin Yu.V., Golovin M.S., Bannikov M.V., Uvarov S.V. Damage accumulation model for an orthotropic composite material // Computational Continuum Mechanics. 2024, vol. 17, no. 1, pp. 44-59. doi.org/10.7242/1999-6691/2024.17.1.5.
15. Kachaev A.E., Chemerichko G.I., Sevostyanov V.S. Experimental studies on improving the abrasive wear resistance of disintegrator pins // Bulletin of Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2024, no. 1, pp. 112-121. doi.org/10.34031/2071-7318-2023-9-1-112-121.

Сведения об авторах:	*Information about authors:*
Чемеричко Галина Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механического оборудования	**Chemerichko Galina Ivanovna** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of mechanical equipment
Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, заведующий отделом эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений, старший научный сотрудник	**Kachaev Aleksandr Evgenievich** – candidate of technical sciences, head of the Department of operation of irrigation and reclamation systems and hydraulic structures, senior researcher
doctor_cement@mail.ru	

Получена 08.10.2026