

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.926

КОЗЛОВСКИЙ
Виталий Игоревич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВЕРХТОНКОГО ПОМОЛА
В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С МЕШАЛКОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий

Минск 2017

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель: **Вайтехович Петр Евгеньевич**,
доктор технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Акулич Александр Васильевич**,
доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе учреждения образования «Могилевский государственный университет продовольствия»

Вилькоцкий Андрей Иванович,
кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация: ОАО «НПО Центр»

Защита состоится 14 ноября 2017 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, в ауд. 240, корп. 4.
Тел. (017) 226-00-39; факс (017) 327-62-17, e-mail: ma@belstu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «11» октября 2017 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

М. В. Дяденко

ВВЕДЕНИЕ

Тонкодисперсные материалы в последнее время находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Одним из основных способов их получения является диспергационный. С целью предотвращения агломерации мелких частиц диспергирование обычно проводят в жидкой среде, которая дополнительно интенсифицирует процесс разрушения материала. Наиболее перспективным агрегатом для реализации тонкого и сверхтонкого помола в жидкой среде являются шаровые мельницы с мешалками. В них, кроме гидростатического и ударного воздействия, добавляется еще и значительный истирающий эффект за счет присутствия мелющих тел в зоне помола. Поэтому по сравнению со скоростными роторными агрегатами они отличаются более высокой производительностью при одновременном снижении энергозатрат на проведение процесса, а соответственно, имеют большие перспективы для промышленного использования. Однако анализ научных работ выявил отсутствие комплексного подхода к изучению данного типа мельниц. В связи с этим проведение теоретических и экспериментальных исследований горизонтальных шаровых мельниц с мешалкой, изучение гидродинамики суспензии и ее влияния на эффективность диспергирования являются весьма актуальными задачами. Они позволят глубже изучить процесс помола в данном агрегате и определить его оптимальные технологические и конструктивные параметры для интенсификации данного процесса с целью получения тонкодисперсных материалов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами.

Данная работа выполнялась в рамках госбюджетных тем ГБ 31-11 «Разработка, исследование высокоэффективных машин и агрегатов» (БГТУ, 2011–2015 гг.); ГБ 14-025 «Разработка теоретических основ тонкого и сверхтонкого измельчения минеральных вяжущих и пигментов в шаровой мельнице с мешалкой» (БГТУ, № гос. регистрации 20141085, 2014 г.); ГБ 31-16 «Исследование и моделирование движения многофазных потоков в технологических агрегатах» (БГТУ, 2016–2020 гг.); ГБ 16-146 «Разработка научных основ получения наноматериалов методом диспергирования в шаровой мельнице с мешалкой» (ГПНИ, № гос. регистрации 20160704, 2016–2020 гг.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованной методики определения оптимальных конструктивных и технологических параметров горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой для обеспечения необходимой эффективности измельчения.

Для достижения поставленной цели необходимо:

– определить наиболее рациональное конструктивное исполнение горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой для получения тонкодисперсных материалов и получить аналитическую зависимость для расчета энергозатрат на процесс перемешивания;

– разработать метод определения границы разделения измельченного продукта в роторном решетчатом сепараторе;

– выявить закономерности изменения дисперсности измельченного продукта и эффективности измельчения от технологических и конструктивных параметров горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой для определения рациональной скорости вращения мешалки и движения суспензии, а также размеров измельчающих тел;

– определить оптимальные значения конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих максимально возможную эффективность измельчения при минимальных удельных энергозатратах.

Объектом исследования является горизонтальная шаровая мельница с мешалкой. **Предмет исследования** – процесс измельчения, осуществляемый в горизонтальной шаровой мельнице с мешалкой.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке методики определения составляющих скорости элементов загрузки и установлении закономерностей изменения дисперсности измельченного продукта и эффективности измельчения от технологических и конструктивных параметров горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой, которые позволят определить оптимальные соотношения геометрических параметров основных деталей и узлов, рациональные скорости вращения мешалки и движения суспензии, а также размеры измельчающих тел для обеспечения максимально возможной эффективности измельчения при минимальных удельных энергозатратах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика определения окружной, радиальной и осевой составляющих скорости элементов загрузки вблизи перемешивающих дисков и в пространстве между ними, основанная на решении уравнений пограничного слоя и компьютерном моделировании, позволяющая определить оптимальные конструктивные соотношения корпуса мельницы и перемешивающего органа и получить аналитическую зависимость для расчета энергозатрат на процесс перемешивания.

2. Метод определения границы разделения измельченного продукта в роторном решетчатом сепараторе, базирующийся на анализе схемы силового воздействия на разделяемые частицы и компьютерном моделировании, позволяющий рассчитать окружную и радиальную скорости частиц вблизи ротора и установить возможность их прохождения между его пальцами.

3. Закономерности изменения дисперсности измельченного продукта и эффективности измельчения в зависимости от технологических и конструктивных параметров горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой, позволяющие установить рациональные скорости вращения мешалки и движения суспензии, а также размеры измельчающих тел.

4. Комбинированный экспериментально-статистический метод оптимизации, включающий планирование эксперимента с использованием центрального рототабельного плана и анализ функций нескольких переменных, позволяющий определить оптимальные значения конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих максимально возможную эффективность измельчения при минимальных удельных энергозатратах.

Личный вклад соискателя ученой степени. Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Соискателем проведен анализ механических воздействий и способов влияния на прочностные характеристики измельчаемых материалов, а также работ, посвященных изучению шаровых мельниц с мешалками. Совместно с научным руководителем автор принимал непосредственное участие в постановке задачи, разработке методик и проведении теоретических и экспериментальных исследований. Для осуществления последних соискателем была спроектирована и изготовлена лабораторная горизонтальная шаровая мельница с мешалкой, на которой проводилось изучение эффективности измельчения и влияния различных факторов на эту величину. Полученные результаты позволили определить рациональные конструктивные и технологические параметры горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой, дать рекомендации по ее проектированию и интенсификации процесса измельчения. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется в рамках, излагаемых в диссертационной работе результатов. Автор осуществлял проектирование промышленных образцов новых конструкций мельниц, курировал их изготовление, принимал активное участие в их промышленных испытаниях.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: 62-й научно-технической конференции студентов и магистрантов (Минск, 2011); 8-й Международной научно-практической конференции «Будущие исследования» (Болгария, 2012); Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2013, 2015); Международной научно-технической конференции «Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития» (Минск, 2013); Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, 2014); Международной научно-технической конференции «Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производства строительных материалов» (Минск, 2015); 78, 79, 80 и 81-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (Минск, 2014–2017). Проведены опытно-промышленные испытания на ОАО «Лакокраска» и ООО «БитумПром».

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 7 статьях в научных журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 7 статьях в материалах конференций, 5 тезисах докладов. Новизна технических решений подтверждена патентом Республики Беларусь (№ 19532). Общий объем опубликованных материалов составляет 3,88 авторского листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня условных обозначений (4 с.), введения (2 с.), общей характеристики работы (3 с.), четырех глав (109 с.), заключения (2 с.), библиографического списка, содержащего 122 использованных источника (10 с.), 20 собственных работ соискателя (3 с.) и приложений (42 с.). Результаты исследований изложены на 105 с. машинописного текста и представлены на 60 иллюстрациях (32 с.) и в 13 таблицах (6 с.).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрены основные направления и области использования тонкодисперсных материалов. Дана оценка диспергационного метода их получения. Показано, что в процессе тонкого и сверхтонкого измельчения параллельно происходит обратный процесс агломерирования мелких частиц. Предотвратить это негативное явление можно при наличии жидкости в зоне разрушения. По этой причине получение продуктов высокой дисперсности достигается при мокром помолу. Основные способы разрушающего воздействия при этом – удар и истирание. Проведен анализ этих методов и указаны преимущества истирающего воздействия. Отмечено, что присутствие жидкости в зоне разрушения, особенно с добавлением поверхностно-активных веществ, снижает прочностные характеристики материала в целом и способствует увеличению степени измельчения при любых способах воздействия. Но при истирании появляется дополнительный интенсифицирующий эффект за счет вымывания и очищения поверхности от мелющих частиц.

Одним из агрегатов, в которых помол осуществляется за счет истирания в среде, воздействующей на прочностные характеристики материала, является шаровая мельница с мешалкой. Именно такой агрегат выбран в качестве объекта исследования. Он представляет собой корпус, заполненный мелкими измельчающими телами, с закрепленными на валу перемешивающими органами, вовлекающими их в интенсивное движение. Материал в виде суспензии, попадая между телами, эффективно разрушается за счет истирающего эффекта.

Анализ процесса помола и конструктивных особенностей мельниц с мешалками показал, что работ в этом направлении крайне мало. Более того, большинство из них имеют прикладной характер и технологическую направленность. Изучалась, как правило, возможность использования мельниц данного типа для измельчения какого-то конкретного продукта. С точки зрения механики исследовалось только влияние некоторых конструктивных элементов перемешивающего органа на степень измельчения. А такие вопросы, как гидродинамика загрузки, определение мощности, затрачиваемой на диспергирование, и оптимальные технологические и конструктивные параметры, остаются без внимания.

Эти нерешенные проблемы свидетельствуют о необходимости проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований горизонтальных шаровых мельниц с мешалками.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию гидродинамики рабочей среды внутри горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой (рисунок 1). Она состоит из рабочей камеры 1, внутри которой расположен ротор 2 с перемешивающими дисками и сетчатый фильтр 3, размещенный внутри вращающегося решетчатого сепаратора 4. Подача и циркуляция суспензии с измельчаемым материалом осуществляется по трубопроводу 5. Степень заполнения рабочей камеры мелющими телами (шариками) достигает 90–95%.

Прежде чем начать исследование гидродинамики рабочей среды, необходимо определиться, что она из себя представляет. Во-первых, это метал-

лические шарики (сыпучая среда), а во-вторых, суспензия, состоящая из воды и размалываемого материала (неньютоновская жидкость). Такая система для аналитического расчета крайне сложна. Обобщающим является то, что анализ движения каждого из компонентов можно проводить на основе уравнений Навье - Стокса.

Одним из допущений, приближающих нашу задачу к инженерной, но все же основанную на законах классической гидромеханики является то, что загрузка внутри мельницы представлена в виде суспензии, содержащей жидкость и твердую фазу в виде шаров и измельчаемого материала. При этом плотность среды вычислялась по формуле

$$\rho_c = \rho_{ш} c_{ш} + \rho_m c_m + \rho_{ж} (1 - c_{ш} - c_m), \quad (1)$$

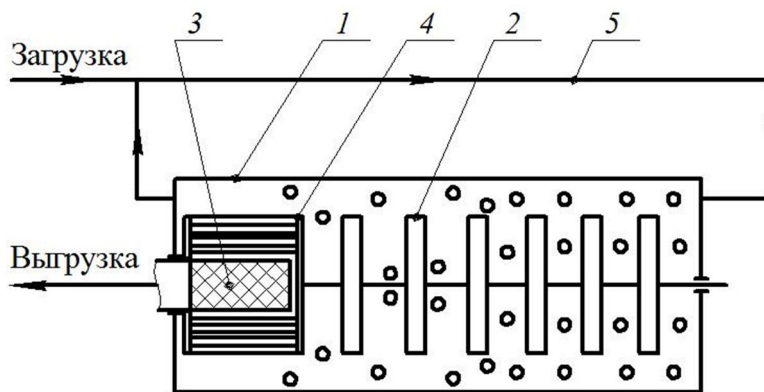
где $\rho_{ш}$ – плотность мелющих тел, кг/м^3 ; $c_{ш}$ и c_m – массовая доля мелющих тел и измельчаемого материала соответственно; ρ_m – плотность измельчаемого материала, кг/м^3 ; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м^3 .

Фиктивная вязкость среды при данной доле твердой фазы рассчитывалась по формуле:

$$\mu_c = \mu_{ж} (1 + 4,5(c_{ш} + c_m)), \quad (2)$$

где $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость жидкости, $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$.

Теоретические исследования были начаты с изучения гидродинамики рабочей среды в мельнице с перпендикулярно расположенными перемешивающими дисками (рисунок 2). При вращении ротора диски увлекают за собой загрузку, приводя ее в движение. За счет эффекта прилипания максимальной скоростью она обладает вблизи дисков, а на отдалении от них снижается. Градиент скоростей в потоке среды инициирует появление касательных напряжений между ее слоями, которые выступают в качестве основного интенсифицирующего фактора при истирающем разрушении материала. Поэтому основной целью изучения гидродинамики среды в мельнице с мешалкой являлось определение распределения профиля ее скоростей в рабочем объеме.



1 – рабочая камера; 2 – ротор; 3 – сетчатый фильтр (патрон); 4 – решетчатый сепаратор; 5 – циркуляционный трубопровод
Рисунок 1. – Схема горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой

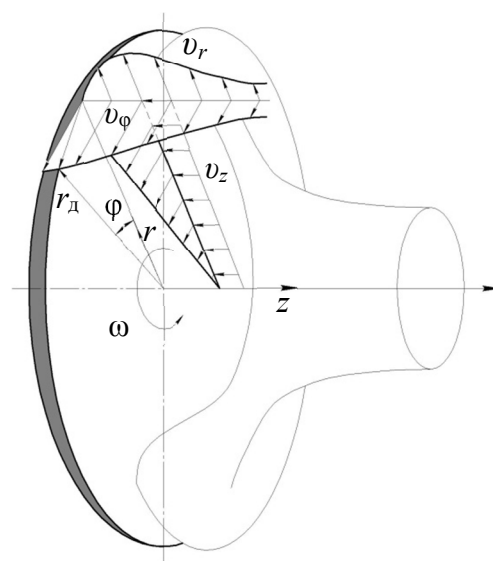


Рисунок 2. – Течение в окрестности диска

Эта цель была реализована с использованием задачи о течении вблизи плоского диска, равномерно вращающегося с постоянной угловой скоростью. Для осесимметричного движения в цилиндрической системе координат уравнения Навье - Стокса и неразрывности имеют следующий вид:

$$\begin{cases} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\varphi^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_c} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_r}{r} \right) - \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right), \\ v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_r v_\varphi}{r} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi}{r} \right) - \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} \right), \\ v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_c} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где v_r , v_φ , v_z – составляющие скорости в радиальном окружном и осевом направлениях соответственно, м/с; r – текущий радиус диска, м; z – осевая координата, м; p – давление (скоростной напор), Па.

Для решения системы уравнений (3) обычно вводится безразмерная координата:

$$\zeta = z \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения диска, рад/с.

Проведя замену переменных v_r , v_φ , v_z и p на функции, которые являются их аналогами и зависят от безразмерной координаты, получили систему обычных дифференциальных уравнений второго порядка. Уравнения были апробированы на мельнице с мешалкой с диаметром корпуса 210 мм и дисков – 135 мм. Угловая скорость варьировалась в диапазоне 125–157 рад/с. Переменными являлись радиус и осевая координата. В результате их решения были определены значения составляющих скорости жидкости вблизи диска. Причем граничные условия при решении этой системы принимались из условия прилипания среды к плоскости диска. Изменение радиальной скорости рабочей среды представлено на рисунке 3. При удалении от диска радиальная составляющая скорости резко возрастает. Ее максимум достигается примерно на расстоянии $z = 4$ мм от диска, но он не превышает 2 м/с по радиусу и увеличивается довольно существенно, а вот угловая скорость на него влияет значительно меньше. Окружная скорость (рисунок 4) достигает существенно больших значений и доходит в исследуемом диапазоне до 10 м/с. Из условия прилипания $v_\varphi = \omega r$

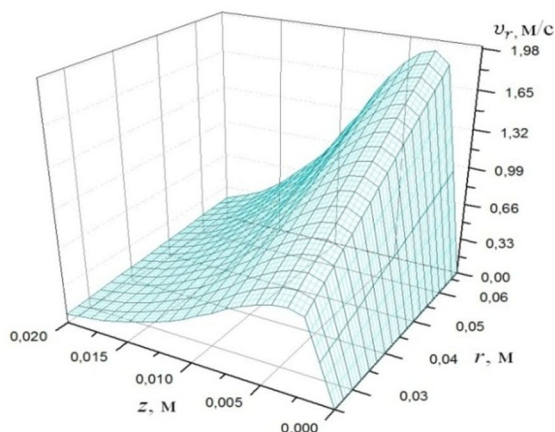


Рисунок 3. – Изменение радиальной скорости в зоне диска

возрастает. Ее максимум достигается примерно на расстоянии $z = 4$ мм от диска, но он не превышает 2 м/с по радиусу и увеличивается довольно существенно, а вот угловая скорость на него влияет значительно меньше. Окружная скорость (рисунок 4) достигает существенно больших значений и доходит в исследуемом диапазоне до 10 м/с. Из условия прилипания $v_\varphi = \omega r$

ее значения на диске максимальны, но затем плавно уменьшаются. Общая закономерность по изменению двух первых составляющих скорости загрузки показывает, что на расстоянии от диска $z = 20$ мм обе они приближаются к нулевым значениям. Это свидетельствует о затухании турбулизации среды на таком отдалении. Осевая скорость потока, изменение которой не представлено, наоборот, со стабильных значений $v_z = 0,6$ м/с на указанном расстоянии постепенно снижается до нуля на диске.

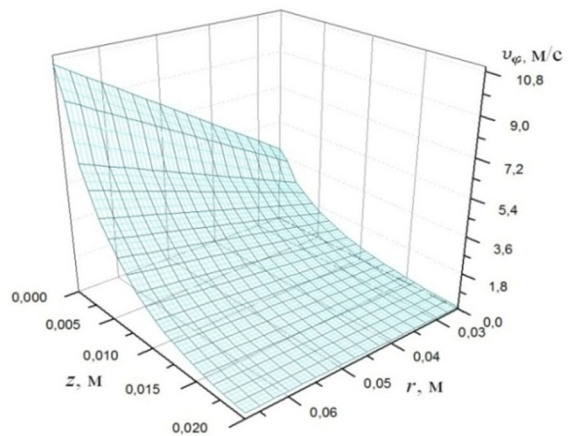


Рисунок 4. – Изменение окружной скорости в зоне диска

Определение составляющих скорости потока вблизи диска позволило через касательные напряжения установить влияние гидродинамики на истирающий эффект в мельнице. Но одновременно эти касательные напряжения эквивалентны силе трения, которую диски преодолевают при вращении в среде. Так, окружная составляющая касательного напряжения на поверхности диска находилась по формуле:

$$\tau_{z\varphi} = \mu \left(\frac{\partial v_{\varphi}}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Для элементарного кольца шириной dr на радиусе r вращающийся момент на преодоление силы трения определялся по формуле:

$$dM = 2\pi r dr \tau_{z\varphi} r. \quad (6)$$

Проинтегрировав это выражение от 0 до r_d , где r_d – радиус диска, м с учетом трения с двух его сторон получили формулу для расчета момента трения для одного диска:

$$M = 0,616 \pi r^4 \rho_c \sqrt{v\omega^3}. \quad (7)$$

Мощность, затрачиваемая на трение ротора с несколькими дисками, – по сути, полезная мощность всей мешалки:

$$N = 0,616 \pi \rho_c \omega^2 r^4 k \sqrt{v\omega}, \quad (8)$$

где k – количество дисков.

Расхождение рассчитанных и экспериментальных значений мощности не превышает 5%.

Методика, основанная на решении дифференциальных уравнений, позволяет оценить значения составляющих скорости среды в радиальном, окружном и осевом направлениях вблизи перемешивающего диска. Однако получить полную гидродинамическую картину распределения скоростей на стыке скоростных потоков между дисками, а также между ними и корпусом при помощи нее не представляется возможным. Поэтому данная задача решалась с использованием компьютерного моделирования.

В процессе компьютерного моделирования изменялись геометрические размеры рабочего органа: диаметр дисков и расстояние между ними при неизменном диаметре корпуса. Результаты моделирования представлены в виде профиля распределения полной скорости по всему объему рабочей камеры (рисунок 5). Видно, что максимальные скорости до 10 м/с достигаются только вблизи дисков и непосредственно возле вращающегося вала. В междисковом пространстве скорость падает и стабилизируется на значении 3–4 м/с. Как и при

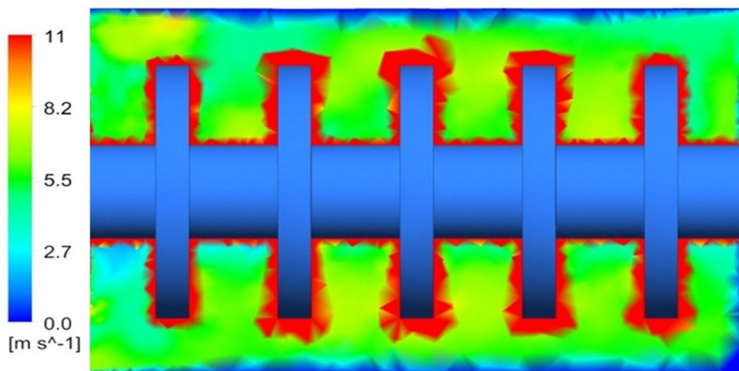


Рисунок 5. – Распределение скорости загрузки внутри шаровой мельницы с мешалкой с перпендикулярными дисками

математическом моделировании, зона турбулентности заканчивается примерно на расстоянии 20 мм от диска. Возле стенок корпуса образуется застойная зона толщиной 5–10 мм, где скорость среды близка к нулевой. Увеличение диаметра дисков позволяет свести эту зону до минимума.

По результатам компьютерного моделирования можно рекомендовать некоторые оптимальные геометрические соотношения мельниц с мешалками. Например, соотношение диаметра диска и корпуса, равным $d_d / d_k = 0,65–0,74$, а расстояние между дисками – $l = 35–45$ мм.

Но вместе с тем компьютерное моделирование показало, что эффективный помол будет осуществляться при резком изменении скорости только вблизи дисков, где из-за большого градиента скоростей возрастают касательные напряжения, а соответственно, и истирающий эффект. Во всем остальном пространстве скорость среды стабильна и помол малоэффективен.

Для интенсификации движения элементов загрузки и увеличения градиента скорости было принято решение установить диски наклонно относительно вала (рисунок 6). Причем угол наклона при компьютерном моделировании изменялся в пределах от 5° до 15° . Его результаты показали, что использование

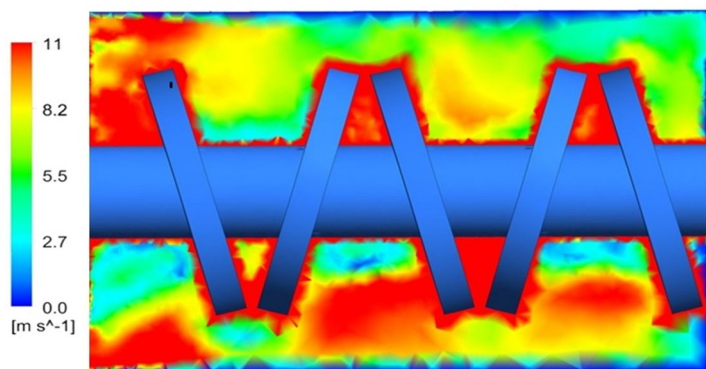


Рисунок 6. – Распределение скорости загрузки внутри шаровой мельницы с мешалкой с наклонными дисками

такого перемешивающего органа способствует турбулизации среды, увеличивает неравномерность ее распределения по всему объему камеры, что приводит к желаемому эффекту в виде роста градиента скорости. Более того, процесс перемешивания становится нестационарным во времени. Все это должно способствовать увеличению эффективности измельчения материалов. Оптималь-

ный угол наклона дисков должен составлять 10–15°.

Компьютерное моделирование использовалось и для определения границы разделения измельчаемого продукта. Этот размер для мельницы непрерывного действия зависит от конструктивных особенностей и режима работы динамического решетчатого сепаратора. Условие прохождения измельченных частиц определялось по балансу сил гидродинамического воздействия P_r и центробежной силы $P_{ц}$ (рисунок 7). Из равенства этих сил установлен граничный размер разделения:

$$d_{ч} = \frac{3}{4} c_{ч} k_{ф} R_{с} \frac{\rho_{с} v_r^2}{\rho_{м} v_{\phi}^2}, \quad (6)$$

где $c_{ч}$ – коэффициент сопротивления движению частицы в жидкости; $k_{ф}$ – коэффициент формы; $R_{с}$ – радиус сепаратора по внешним краям пальцев, мм.

Поскольку размер частиц, проходящих через сепаратор, составляет менее 10 мкм, то можно считать скорость их движения равной скорости жидкой среды. Именно она и была определена с помощью компьютерного моделирования. Сначала, как и в зоне измельчения, были построены профили распределения окружной и радиальной составляющих скорости среды в сечении сепаратора, а затем из него в качестве фрагмента выделено изменение этих составляющих в секторе решетчатого ротора с углом 50°, в котором размещено несколько пальцев. На рисунке 8 показан такой фрагмент для радиальной скорости, изменяющейся в пределах 10 мм от пальцев сепаратора. Максимальное ее значение достигается напротив пальцев, стабильное – в межпальцевом пространстве, которое в первую очередь важно для прохождения сепарируемых частиц. Такой же характер распределения наблюдается и для окружной скорости, только ее значения в 1,5–2 раза выше.

Но нахождение частиц между пальцами сепаратора накладывает еще одно важное условие. Оно заключается в том, что за время перемещения пальца из положения 1 в положение 2 (рисунок 7) частица должна пройти расстояние, равное половине диаметра пальца. Из этого условия ее радиальная скорость определяется по формуле:

$$v_r = \frac{d_{п} n z_{п}}{2}, \quad (7)$$

где $d_{п}$ – диаметр пальца сепаратора, м; n – частота вращения сепаратора, c^{-1} ; $z_{п}$ – количество пальцев.

На графике (рисунок 8) она показана прямой линией.

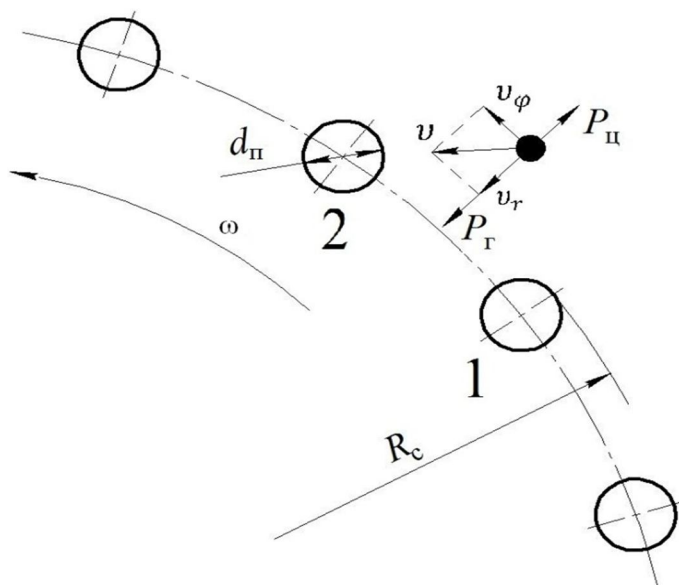


Рисунок 7. – Расчетная схема динамического сепаратора

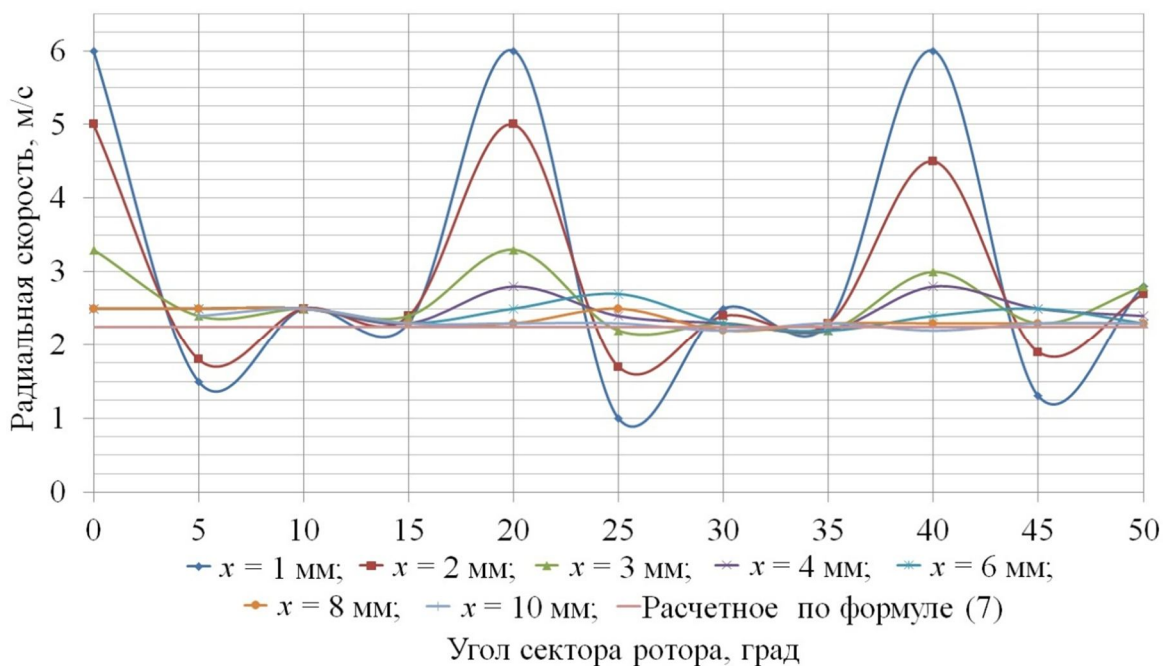


Рисунок 8. – Изменение радиальной скорости при отдалении от пальцев сепаратора

Предлагаемая методика расчета граничного размера была апробирована на экспериментальной шаровой мельнице с мешалкой. Расхождение экспериментальных и расчетных значений диаметров частиц не превышало 5%.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований процесса помола в горизонтальной шаровой мельнице с мешалкой. Диаметр ее корпуса составлял 210 мм, общий объем – 9 л. Для перемешивания использовались мешалки с перпендикулярными и наклонными дисками. В качестве измельчающих тел применялись чугунные шарики диаметром 0,5; 1; 2 и 3 мм, которыми заполнялась рабочая камера на 90–95%. При проведении экспериментов изменялась частота вращения мешалки от 1100 до 1500 об/мин, что соответствовало линейной скорости по кромкам дисков 8,5–10,6 м/с. Кроме того, варьировалась и подача исходного продукта, обеспечивающая изменение скорости суспензии на полное сечение мельницы в пределах 0,097–0,226 м/с.

Измельчению подвергались каолин, мел и «белая сажа» (гидратированный диоксид кремния) с твердостью по шкале Мооса соответственно 1; 3 и 5.

В зависимости от режима работы мельницы отбор проб проводился со следующим временным интервалом:

- 1) при периодическом режиме – в диапазоне 1–30 мин;
- 2) при непрерывном режиме – после того как мельница выходила на установившийся режим работы (5 мин).

Изучение фракционного состава проб, их анализ проводились на лазерном микроанализаторе фирмы Fritsch при помощи измерительного комплекса Analysette 22, который выдавал результаты в виде характеристик крупности частиц в объеме пробы.

Для оценки влияния различных факторов на качество измельчения был введен критерий эффективности, определяемый по формуле:

$$E = 100 - R_{10}, \quad (8)$$

где R_{10} – аналог остатка на сите с отверстиями 10 мкм.

Поэтому большая часть экспериментального материала представлена в виде функциональных зависимостей $E = f(x_i)$, где x_i – граничный размер. Каждая точка на этих графиках получена по отдельной характеристике крупности.

Основная цель первого этапа экспериментальных исследований заключалась в изучении кинетики измельчения материалов в мельнице, работающей периодически, причем исследовался только вариант мельницы с перпендикулярно расположенными дисками.

По результатам этой серии опытов получены характеристики крупности для всех исследуемых материалов, одна из которых представлена на рисунке 9. По ней видно, что уже через 5 мин помола до 80% частиц имеют размер менее 10 мкм. Более наглядно кинетика измельчения прослеживается по величине эффективности диспергирования (рисунок 10). Как и для большинства других процессов, ее изменение во времени носит экспоненциальный характер. Правда, эта экспонента с явной точкой перегиба во временном интервале, близком к 5 мин. По обе стороны от нее эффективность диспергирования изменяется с разной скоростью. В процессе исследования кинетики измельчения дополнительно установлено влияние на эффективность процесса частоты вращения мешалки и размера мелющих тел. Уменьшение диаметра мелющих тел с 3 до 1 мм позволило увеличить эффективность диспергирования на 10–20%, причем в интервале изменения линейной скорости мешалки с 8,5 до 10,0 м/с она повышается на 35–45%. Последний факт как раз подтверждает предположение, сделанное при аналитическом исследовании, о влиянии градиента скорости на истирающий эффект.

Последующие экспериментальные исследования были направлены на изучение параметров мельницы с мешалкой, работающей в непрерывном режиме с замкнутым циклом движения загрузки. Здесь исследовалось два конструктивных варианта мельницы: с перпендикулярными и наклонными дисками. Измельчае-

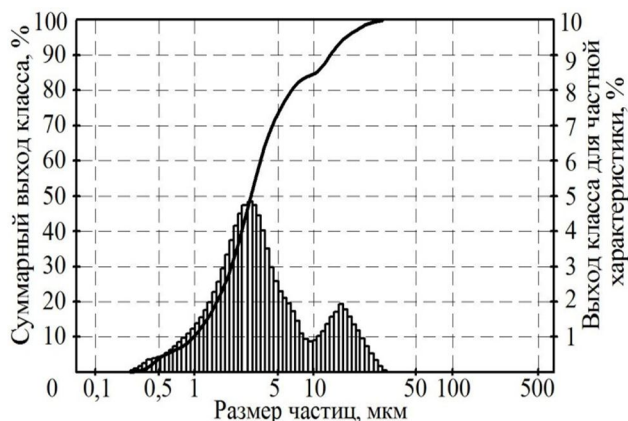


Рисунок 9. – Характеристика крупности распределения размеров частиц мела при времени измельчения 5 мин, $n = 1500$ об/мин, $d_{ш} = 1$ мм

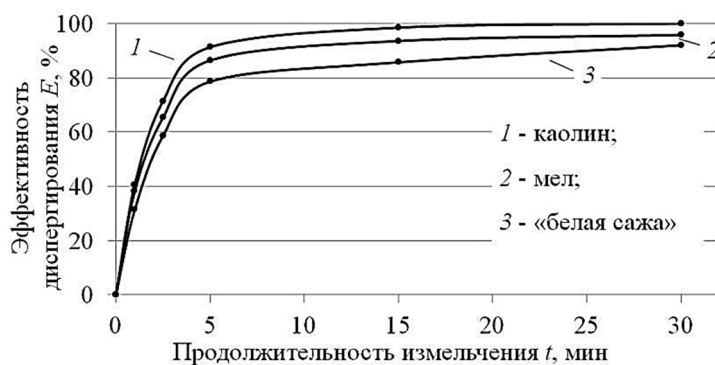
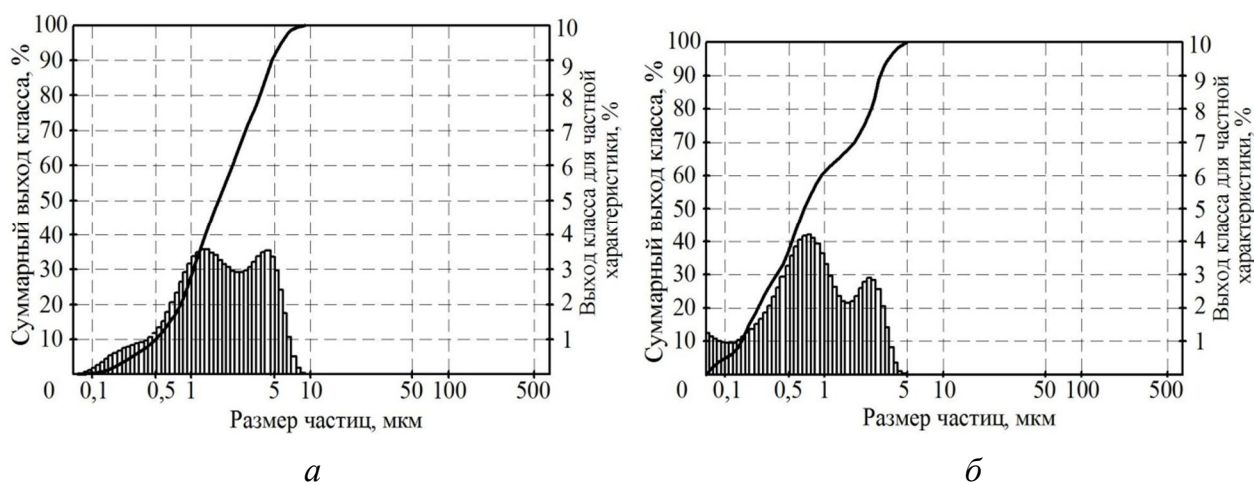


Рисунок 10. – Зависимость эффективности диспергирования от времени обработки материала при $n = 1500$ м/с, $d_{ш} = 1$ мм

мые материалы и варьируемые параметры в основном оставались прежними. Но одновременно появился один новый, обусловленный режимом работы мельницы, – скорость движения суспензии, рассчитанная на полное сечение рабочей камеры – v_c . В дополнение к этому диаметр измельчающих тел был уменьшен до 0,5 мм.

Результаты измельчения материала с разными конструкциями перемешивающих органов приведены на рисунке 11. Преимущества наклонных дисков здесь очевидны. Во-первых, максимальный размер частиц с 10 мкм при перпендикулярных дисках уменьшился до 5 мкм при наклонных. Во-вторых, максимумы (пики) на частной характеристике крупности сместились в сторону меньших частиц. И такая закономерность характерна для всех измельчаемых материалов.



а – диски, расположенные перпендикулярно; б – диски, расположенные под углом
Рисунок 11. – Характеристики крупности распределения размеров частиц
каолина при $v_c = 0,097$ м/с, $d_{ш} = 0,5$ мм, $v_d = 10,6$ м/с

Как и в предыдущей серии опытов, влияние различных параметров на процесс диспергирования для двух типов мешалок оценивалось через эффективность. Особый интерес в этом случае вызывало воздействие скорости движения суспензии, которая эквивалентна производительности мельницы. На рисунке 12 в качестве примера представлено изменение эффективности диспергирования каолина от указанного параметра.

Как для каолина, так и для других материалов увеличение скорости движения суспензии приводило к загрубению конечного продукта, а соответственно, к падению эффективности диспергирования в среднем на 5–30%. Это обусловлено двумя причинами: сокращением времени пребывания материала в зоне помола и увеличением скорости движения суспензии между пальцами сепаратора.

Но снижение эффективности диспергирования при повышении скорости движения суспензии может быть компенсировано за счет уменьшения диаметра мелющих тел (рисунок 13). В частности, переход на шарики диаметром 0,5 мм приводит к существенному ее увеличению.

Что касается скорости вращения мешалки, то ее увеличение с 8,5 до 10,6 м/с способствовало возрастанию эффективности на 20–30%. Это еще раз подтвердило

связь истирающего эффекта с градиентом окружной скорости загрузки.

Применение наклонных дисков вместо перпендикулярных позволило достичь более высокой эффективности диспергирования. В целом, можно отметить, что наклонные диски способствуют ее увеличению на 10–15%. Это обусловлено более развитой турбулентностью по всему объему камеры измельчения, которая была изучена в теоретической части.

Полученные по результатам экспериментов графические зависимости показывали, как правило, влияние одного параметра на эффективность диспергирования. Все остальные параметры при этом были зафиксированы. В результате возникли трудности с оценкой влияния всех параметров в комплексе и главное в нахождении их оптимальных значений для обеспечения максимальной эффективности процесса. В связи с этим был использован метод экспериментально-статистической оптимизации, реализуемый в виде планирования эксперимента. В качестве плана для проведения многофакторного эксперимента по измельчению материалов был выбран центральный композиционный ротатабельный план типа Вп.

После проведения проверок значимости и адекватности коэффициентов регрессии были получены окончательные уравнения для расчета эффективности диспергирования при использовании перпендикулярных ($E_{\text{п}}$) и наклонных ($E_{\text{н}}$) дисков:

$$E_{\text{п}} = 80,3 - 5,3d_{\text{ш}} + 4v_{\text{д}} - 7v_{\text{с}} - 2,5\rho_{\text{м}} + 0,15d_{\text{ш}}v_{\text{д}} - 0,1d_{\text{ш}}v_{\text{с}} - 1,1d_{\text{ш}}\rho_{\text{м}} + 0,4v_{\text{д}}v_{\text{с}} - 0,4v_{\text{д}}\rho_{\text{м}} - 0,1v_{\text{с}}\rho_{\text{м}} - 0,3d_{\text{ш}}v_{\text{д}}v_{\text{с}} + 0,2d_{\text{ш}}v_{\text{д}}\rho_{\text{м}} + 0,1d_{\text{ш}}v_{\text{с}}\rho_{\text{м}} + 0,2d_{\text{ш}}v_{\text{д}}v_{\text{с}}\rho_{\text{м}} \quad ; \quad (9)$$

$$E_{\text{н}} = 88,9 - 4,9d_{\text{ш}} + 2,7v_{\text{д}} - 5,1v_{\text{с}} - 3\rho_{\text{м}} + 0,5d_{\text{ш}}v_{\text{д}} - 1,2d_{\text{ш}}v_{\text{с}} - 0,8d_{\text{ш}}\rho_{\text{м}} + 0,7v_{\text{д}}v_{\text{с}} - 0,55v_{\text{с}}\rho_{\text{м}} - 0,45d_{\text{ш}}v_{\text{д}}v_{\text{с}} + 0,1d_{\text{ш}}v_{\text{д}}\rho_{\text{м}} + 0,3d_{\text{ш}}v_{\text{с}}\rho_{\text{м}} - 0,14d_{\text{ш}}v_{\text{д}}v_{\text{с}}\rho_{\text{м}} \quad ; \quad (10)$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр мелющих шариков, мм; $v_{\text{д}}$ – линейная скорость по кромкам дисков, м/с; $v_{\text{с}}$ – скорость подачи суспензии, м/с; $\rho_{\text{м}}$ – плотность измельчаемого материала, кг/м³.

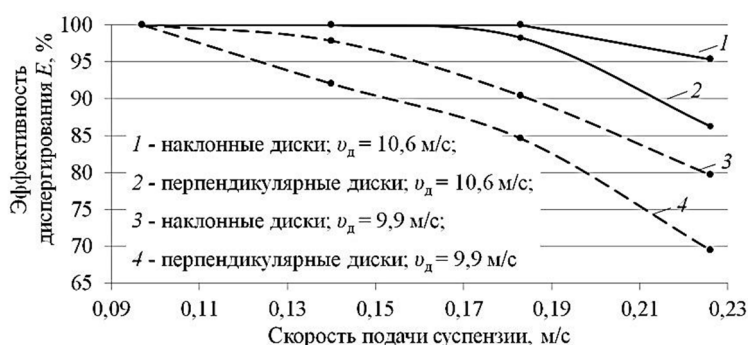


Рисунок 12. – Зависимость эффективности диспергирования от скорости подачи суспензии каолина при $d_{\text{ш}} = 0,5$ мм

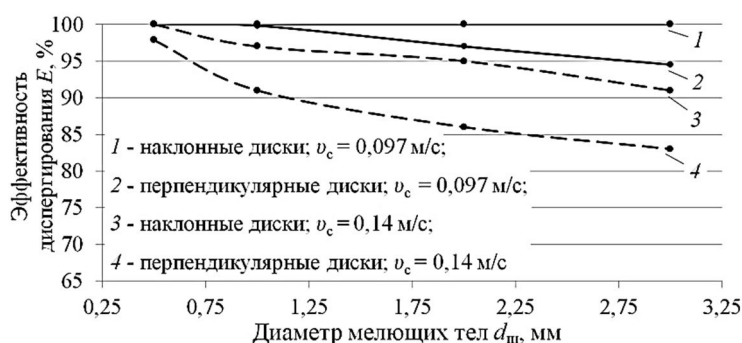


Рисунок 13. – Зависимость эффективности диспергирования от диаметра мелющих тел при $v_{\text{д}} = 10,6$ м/с

Кроме эффективности измельчения, второй важной характеристикой являются энергозатраты на проведение этого процесса. В шаровой мельнице с мешалкой можно выделить две основные составляющие этих затрат: на перемешивание среды и на подачу суспензии. При большинстве фиксированных параметров автором была установлена функциональная связь мощности на перемешивание $N_{\text{п}}=Av_{\text{д}}^{2,5}$, подачу суспензии $N_{\text{н}}=Bv_{\text{с}}^3$ со скоростями диска $v_{\text{д}}$ и суспензии $v_{\text{с}}$. Для упрощения анализа введены аналогии этих скоростей $v_{\text{д}}^{2,5} = U$ и $v_{\text{с}}^3 = V$. По экспериментальным данным были построены графические зависимости эффективности диспергирования от принятых аналогов (рисунок 14). Пересечение двух кривых дает точку с максимально возможной эффективностью диспергирования при минимальных суммарных энергозатратах. Использование этого метода, основанного на экспериментальных данных, путем расчета удельных энергозатрат, приходящихся на единицу удельной поверхности, позволило сравнить по этому показателю два исследуемых конструктивных варианта.

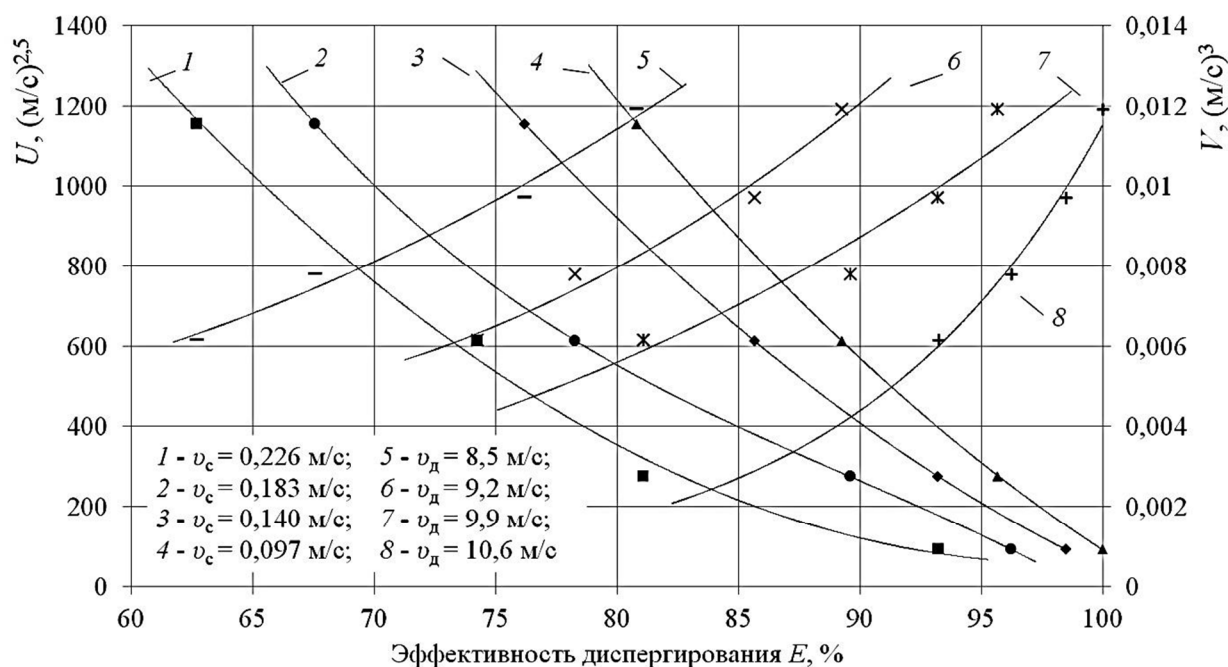


Рисунок 14. – Диаграмма определения энергозатрат для мельницы с наклонными дисками (измельчаемый материал – «белая сажа», диаметр мелющих тел – 0,5 мм)

Применение наклонных дисков приводит к повышению затрат мощности на перемешивание. Но за счет уменьшения среднего диаметра частиц, а соответственно, увеличения удельной поверхности удельные энергозатраты снижаются.

В четвертой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний нового перемешивающего органа с наклонными дисками для шаровой мельницы с мешалкой на ОАО «Лакокраска» для измельчения пигментов: крон свинцовый желтый и сажа П-803. Из-за невозможности в заводских условиях довести частоту вращения перемешивающего органа до оптимальных значений не удалось достичь значительного повышения эффективности диспергирования. Но положительным результатом этих

испытаний следует считать практически установленную возможность импортозамещения, заключающуюся в изготовлении своими силами более дешевого органа по сравнению с зарубежным.

Опытно-промышленные испытания также проводились на ООО «БитумПром» в цехе по производству эмалей. Измельчению подвергались пигменты: зелень цинковая и ультрамарин. Причем частота вращения перемешивающего органа с наклонными дисками в данном случае соответствовала требуемой и составляла 1500 об/мин. В результате средний размер частиц конечного продукта был получен на 8 мкм меньше, чем на действующих заводских агрегатах. В таком диапазоне размеров частиц это можно считать довольно хорошим результатом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Получена методика определения окружной, радиальной и осевой составляющих скорости элементов загрузки вблизи перемешивающих дисков и в пространстве между ними, основанная на решении уравнений пограничного слоя и компьютерном моделировании. Установлено, что при движении рабочей загрузки вблизи вращающегося диска мельницы происходит ее трехмерное течение, при этом наиболее значительное влияние на характер движения оказывает окружная составляющая скорости, которая в несколько раз больше остальных. Кроме того, полученная методика дала возможность определить оптимальные конструктивные соотношения диаметров корпуса мельницы и перемешивающего органа и получить аналитическую зависимость для расчета энергозатрат на процесс перемешивания. Все это позволило спроектировать конструкцию горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой, которая обеспечивает оптимальное движение рабочей загрузки для достижения наиболее эффективного измельчения [4, 7, 13, 14, 16].

2. На основании анализа силовых факторов, действующих на разделяемые частицы, разработана методика определения границы разделения измельченного продукта в роторном решетчатом сепараторе. С помощью компьютерного моделирования получены значения окружной и радиальной скоростей частиц в рабочем пространстве сепаратора, позволяющие рассчитать их диаметр и проверить, обладают ли они достаточной радиальной скоростью, чтобы пройти сквозь пальцы сепаратора [19].

3. Установлены закономерности изменения дисперсности измельченного продукта и эффективности измельчения от технологических и конструктивных параметров горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой для определения рациональной скорости вращения мешалки и движения суспензии, а также размеры измельчающих тел. В результате экспериментально подтверждено, что использование нового перемешивающего органа с наклонными дисками способствовало увеличению эффективности диспергирования на 10–15% и снижению удельных энергозатрат на $0,40\text{--}0,65 \text{ Вт} \cdot \text{кг/м}^2$ по сравнению с перпендикулярными [1–3, 5, 6, 8–12, 15, 17, 18].

4. С помощью комбинированного экспериментально-статистического метода оптимизации, включающего планирование эксперимента с использованием центрального рототабельного плана и анализа функций нескольких переменных, получены уравнения, дающие возможность оценить влияние основных технологических параметров на эффективность диспергирования. Кроме того, определены оптимальные значения конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих максимально возможную эффективность измельчения при минимальных удельных энергозатратах [4, 14, 16, 20].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные результаты могут быть использованы при расчете, проектировании и эксплуатации горизонтальных шаровых мельниц с мешалками для сверхтонкого и коллоидного помола материалов. При этом для получения продукта с наименьшим размером частиц необходимо выполнение следующих условий:

– линейная скорость по кромкам мешалки должна находиться в пределах 9,9–10,6 м/с;

– конструктивное исполнение перемешивающего органа должно обеспечивать нестационарное перемещение загрузки с целью обеспечения необходимого градиента окружной скорости и для достижения максимального истирающего эффекта;

– скорость подачи суспензии должна быть как можно меньше, но в то же время обеспечивать необходимую производительность;

– обработка материала должна осуществляться мелющими телами с наименьшим диаметром. Оптимальным диаметром шариков для получения сверхтонких частиц считается 1–3 мм, а для коллоидных частиц – 0,5 мм.

2. Проведенные опытно-промышленные испытания на ОАО «Лакокраска» и ООО «БитумПром», в которых для измельчения пигментов применялся новый перемешивающий орган с наклонными дисками, показали, что данная конструкция может быть успешно использована в качестве альтернативы зарубежным аналогам.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Козловский, В. И. Измельчение материалов в шаровой мельнице с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Труды БГТУ. – 2012. – № 3: Химия и технология неорганических веществ. – С. 126–129.

(Kozlovski, V. I. Crushing of materials in the spherical mill with the mixer / V. I. Kozlovski, P. E. Vaytekhovich // Proceedings of BSTU. – 2012. – No. 3: Chemistry and technology of inorganic substances. – P. 118–121.)

2. Козловский, В. И. Анализ дисперсности продуктов в шаровой мельнице с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович, А. М. Волк // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85, вып. 11. – С. 1895–1898.

3. Вайтехович, П. Е. Интенсивность шарового измельчения в быстроходных мельницах / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семененко, Д. Н. Боровский, В. И. Козловский // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – № 9. – С. 46–52.

4. Козловский, В. И. Влияние конструктивных особенностей шаровой мельницы с мешалкой на ее эффективность / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2015. – № 7. – С. 43–45.

5. Козловский, В. И. Измельчение материалов в шаровой мельнице с мешалкой непрерывного действия / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Вестник ПГУ. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 61–65.

6. Козловский, В. И. Влияние размера мелющих тел на эффективность диспергирования материала в шаровой мельнице с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович, Т. В. Камлюк // Труды БГТУ. – 2016. – № 3: Химия и технология неорганических веществ. – С. 136–141.

7. Козловский, В. И. Определение энергозатрат на вращение рабочего органа шаровой мельницы с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 5-6. – С. 14–17.

(Kozlovski, V. I. Estimation of the energy cost for rotation of the operating element of a ball mill with a mixer / V. I. Kozlovski, P. E. Vaytekhovich // Chemical and petroleum engineering. – 2016. – No. 5-6 – P. 320–326.)

Материалы конференций

8. Козловский, В. И. Исследование процесса измельчения в бисерной мельнице / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // 62-я научно-техническая конференция студентов и магистрантов: сб. науч. работ: в 3 ч. Ч. 2. – Минск: БГТУ, 2011. – С. 405–408.

9. Козловский, В. И. Эффективность диспергирования материалов в шаровой мельнице с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Бъдещите изследвания материали за 8-а международна научна практическа конференция, България: 17–25 февр. 2012 г. – България, 2012. – Т. 33. – С. 53–56.

10. Козловский, В. И. Эффективность диспергирования и перспективы использования шаровой мельницы с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазанов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2013. – С. 100.

11. Козловский, В. И. Использование шаровых мельниц с мешалками для сверхтонкой микронизации в производстве тонкодисперсного мела / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 февр. 2013 г. / Белорус. гос. технолог. ун-т. – Минск, 2013. – С. 47–50.

12. Козловский, В. И. Эффективность шаровой мельницы с мешалкой в периодическом и непрерывных режимах / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 нояб. 2014 г.: в 2 ч. Ч. 1 / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2014. – С. 258–261.

13. Козловский, В. И. Методы определения энергозатрат в шаровой мельнице с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазанов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 207.

14. Козловский, В. И. Влияние конструктивных и гидродинамических параметров на эффективность измельчения материалов в шаровой мельнице с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производства строительных материалов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 нояб. 2015 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2015. – С. 468–471.

Тезисы докладов

15. Козловский, В. И. Применение шаровой мельницы с мешалкой для тонкого диспергирования материалов / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Химическая технология и техника: тезисы 78-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и

аспирантов (с международным участием), Минск, 3–10 февр. 2014 г. [Электронный ресурс] / Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2014. – С. 51.

16. Козловский, В. И. Распределение скоростей суспензии в зоне перемешивания шаровой мельницы с мешалкой / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Химическая технология и техника: тезисы 79-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 2–6 февр. 2015 г. [Электронный ресурс] / Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2015. – С. 57.

17. Козловский, В. И. Эффективность измельчения в шаровой мельнице с мешалкой с наклонными дисками / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Химическая технология и техника: тезисы 79-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 2–6 февр. 2015 г. [Электронный ресурс] / Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2015. – С. 58.

18. Козловский, В. И. Взаимосвязь эффективности измельчения материалов в шаровой мельнице с мешалкой и размера мелющих тел / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович // Химическая технология и техника: тезисы 80-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–12 февр. 2016 г. [Электронный ресурс] / Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2016. – С. 57.

19. Козловский, В. И. Разделение материалов в сепараторе горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой / В. И. Козловский // Химическая технология и техника: тезисы 81-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–12 февр. 2017 г. [Электронный ресурс] / Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2017. – С. 61.

Патент

20. Шаровая мельница с мешалкой: пат. 19532 Респ. Беларусь, 6 МПК В 02С 17/16, В 02В 15/12 / В. И. Козловский, П. Е. Вайтехович; заявитель Беларус. гос. технол. ун-т. – № а20121354; заявл. 26.09.2012; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 5. – С. 49–50.

РЭЗЮМЭ

Казлоўскі Віталь Ігаравіч

Аптымізацыя працэсу звыштонкага памолу ў шаравым млыне з мяшалкай

Ключавыя словы: млын, дыспергіраванне, здрабляльныя целы, загрузка, сціранне, хуткасць, перамешвальны орган, магутнасць, сепаратар, эфектыўнасць, энергаёмістасць, выпрабаванні.

Аб'ект даследавання – гарызантальны шаравы млын з мяшалкай.

Мэтай дысертацыйнай работы з'яўляецца распрацоўка навукова абгрунтаванай методыкі вызначэння аптымальных канструктыўных і тэхналагічных параметраў гарызантальнага шаравога млына з мяшалкай для забеспячэння неабходнай эфектыўнасці здрабнення.

У рабоце прааналізаваны вынікі тэарэтычнага вывучэння працэсу дыспергіравання, спосабы павышэння яго эфектыўнасці і вызначэння аптымальнай энергаёмістасці. Вызначаны перавагі, недахопы і магчымасці інтэнсіфікацыі шаравога здрабнення матэрыялаў. У выніку гэтага ўстаноўлена, што адным з найбольш перспектыўных напрамкаў павышэння эфектыўнасці дыспергіравання з'яўляецца інтэнсіфікацыя руху здрабляльных цел у рабочай камеры і паслабленне трываласных характарыстык матэрыялу за кошт памольнага асяроддзя, у якім яно адбываецца. Усё гэта можна ажыццявіць у гарызантальным шаравым млыне з мяшалкай. Тэарэтычныя даследаванні гэтага тыпу памольных агрэгатаў дазволілі выявіць размеркаванне профілю хуткасцей загрузкі ў рабочам аб'ёме, вызначыць аптымальныя суадносіны геаметрычных параметраў млына і мяжу падзелу дынамічнага сепаратара, а таксама атрымаць аналітычную залежнасць для разліку магутнасці, якая ідзе на перамешванне загрузкі.

Вынікі эксперыментальнага вывучэння працэсу дыспергіравання падцвердзілі высновы, зробленыя ў тэарэтычнай частцы работы, і далі магчымасць ацаніць уплыў тэхналагічных і геаметрычных параметраў на працэс памолу і энергазатраты пры гэтым.

На падставе вынікаў і рэкамендацый тэарэтычнай і эксперыментальнай часткай работы спраектавана канструкцыя перамешвальнага органа і праведзены доследна-прамысловыя выпрабаванні на ААТ “Лакафарба” і ТАА “БітумПрам” для памолу пігментуючых рэчываў.

РЕЗЮМЕ

Козловский Виталий Игоревич

Оптимизация процесса сверхтонкого помола в шаровой мельнице с мешалкой

Ключевые слова: мельница, диспергирование, мелющие тела, загрузка, истирание, скорость, перемешивающий орган, мощность, сепаратор, эффективность, энергоемкость, испытания.

Объект исследования – горизонтальная шаровая мельница с мешалкой.

Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованной методики определения оптимальных конструктивных и технологических параметров горизонтальной шаровой мельницы с мешалкой для обеспечения необходимой эффективности измельчения.

В настоящей работе проанализированы результаты теоретического изучения процесса диспергирования, способы повышения его эффективности и определения оптимальной энергоемкости. Определены достоинства, недостатки и возможности интенсификации шарового измельчения материалов. В результате этого установлено, что одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности диспергирования является интенсификация движения мелющих тел в рабочей камере и ослабление прочностных характеристик материала за счет помольной среды, в которой оно происходит. Все это можно осуществить в горизонтальной шаровой мельнице с мешалкой. Теоретические исследования этого типа помольных агрегатов позволили установить распределения профиля скоростей загрузки в рабочем объеме, определить оптимальные соотношения геометрических параметров мельницы и границу разделения динамического сепаратора, а также получить аналитическую зависимость для расчета мощности, затрачиваемой на перемешивание загрузки.

Результаты экспериментального изучения процесса диспергирования подтвердили выводы, сделанные в теоретической части работы, и дали возможность оценить влияние технологических и геометрических параметров на процесс помола и энергозатраты при этом.

На основании вывода и рекомендаций теоретической и экспериментальной частей работы спроектирована конструкция перемешивающего органа и проведены опытно-промышленные испытания на ОАО «Лакокраска» и ООО «БитумПром» для помола пигментирующих веществ.

SUMMARY

Kozlovskiy Vitaliy Igorevich

Optimization of the ultrafine grinding in a ball mill with a mixer

Key words: mill, dispersion, grinding body, loading, galling, speed, mixing body, power, separator, efficiency, energy intensity, testing.

The object of study is a horizontal ball mill with a mixer.

The aim of the thesis is to develop scientifically based methods for determining the optimal structural and technological parameters of the horizontal ball mill with a mixer to provide the necessary crushing efficiency.

In this thesis we analyzed the results of theoretical study of the dispersion process, the ways of increasing its efficiency and the determination of the optimal energy consumption. It has been identified the advantages, disadvantages and opportunities of intensification of ball milling of the materials. As a result, it has been found that one of the most promising directions to increase the efficiency of dispersion is the intensification of the movement of the grinding bodies in the processing chamber and the weakening of the strength characteristics of the material due to the grinding of the environment in which it occurs. All this can be done in a horizontal ball mill with the mixer. The theoretical studies of this type of the grinding units allowed to establish the distribution of the download speeds profile in the working volume, determine the optimum combination of geometrical parameters of the mill and the cut point of the dynamic separator, as well as to obtain analytical dependence for calculating the power required for mixing the load.

The results of the experimental study of the dispersion process confirmed the findings made in the theoretical part of the work and gave the opportunity to evaluate the influence of technological and geometrical parameters on the milling process and energy consumption.

On the basis of the conclusion and recommendations in the theoretical and experimental parts of the work the mixing body was designed and pilot tests of the grinding of pigmenting substances were conducted at the public corporation “Lakokraska” and the public limited company “Bitumprom”.

Научное издание

Козловский Виталий Игоревич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВЕРХТОНКОГО ПОМОЛА
В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С МЕШАЛКОЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий
(технические науки)

Ответственный за выпуск В. И. Козловский

Подписано в печать 06. 10. 2017. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.