



УДК 004.942

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-5-14>Научная статья
Research article

Влияние передаточного отношения на энергосиловые условия столкновения размольных тел в планетарной мельнице

А. В. Аборкин¹✉, А. И. Елкин¹, В. В. Рябкова¹,
А. П. Бугаёв¹, А. Р. Бобожанов², М. И. Алымов²

¹ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
Россия, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87

² Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН
Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8

✉ aborkin@vlsu.ru

Аннотация. Высокоэнергетическая обработка в планетарных мельницах нашла широкое применение для решения задач механического легирования/активации, синтеза композиционных порошковых смесей и переработки стружечных отходов. При этом передача механической энергии в обрабатываемое вещество зависит, в том числе, и от технологических параметров механической обработки, определяющих механику движения размольных тел, а следовательно, и энергосиловые характеристики процесса. Для изучения влияния передаточного отношения на энергосиловые условия механической обработки разработана, численно реализована и валидирована дискретно-элементная модель движения размольных тел в планетарной мельнице. Определены параметры модели, обеспечивающие разумное согласование экспериментальной и расчетной структур мгновенных изображений размольных тел на установившемся режиме работы мельницы. С помощью модели проведены серии численных экспериментов с варьированием передаточного отношения K от 1 до 2. Показано, что увеличение K в указанном диапазоне ведет к изменению характера движения размольных тел с режима перекатывания на перекатывание и свободный полет. Это снижает число столкновений и одновременно обеспечивает рост их силовых характеристик. Проведен анализ изменения суммарной потери энергии при столкновениях «тело–тело» и «тело–камера». Установлено, что при изменении K от 1 до 2 повышение суммарной потери энергии при столкновениях в основном происходит за счет увеличения потери энергии при столкновениях пар «тело–тело». Разработанные модели и полученные расчетные оценки влияния передаточного отношения на энергосиловые характеристики столкновений могут быть использованы при разработке рациональной технологии механической обработки в планетарной мельнице.

Ключевые слова: высокоэнергетический размол, метод дискретных элементов, энергосиловые характеристики, столкновения, характер движения размольных тел

Благодарности: Авторы выражают благодарность проф. А.С. Рогачеву за помощь в организации и проведении экспериментального исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00889, <https://rscf.ru/project/23-29-00889/>.

Для цитирования: Аборкин А.В., Елкин А.И., Рябкова В.В., Бугаёв А.П., Бобожанов А.Р., Алымов М.И. Влияние передаточного отношения на энергосиловые условия столкновения размольных тел в планетарной мельнице. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2025;19(1):5–14. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-5-14>

Influence of gear ratio on the energy-force conditions of grinding body collisions in a planetary mill

A. V. Aborkin¹✉, A. I. Elkin¹, V. V. Ryabkova¹,
A. P. Bugayov¹, A. R. Bobozhanov², M. I. Alymov²

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
87 Gorky Str., Vladimir 600000, Russia

²Merzhanov Institute of Structural MacrokINETICS and Materials Science of the Russian Academy of Sciences
8 Akademika Osip'yan Str., Chernogolovka, Moscow Region 142432, Russia

✉ aborkin@vlsu.ru

Abstract. High-energy milling in planetary mills has found widespread application for tasks such as mechanical alloying/activation, synthesis of composite powder mixtures, and recycling of chip waste. The transfer of mechanical energy to the processed material depends, among other factors, on the technological parameters of mechanical processing, which determine the motion of the grinding bodies and, consequently, the energy-force characteristics of the process. To study the effect of the gear ratio on the energy-force conditions of mechanical processing, a discrete element model of grinding body motion in a planetary mill was developed, numerically implemented, and validated. Model parameters were determined to ensure reasonable agreement between the experimental and calculated structures of instantaneous images of grinding body motion in the steady-state operation of the mill. Using the model, a series of numerical experiments were conducted, varying the gear ratio K from 1 to 2. It was shown that increasing K within this range changes the motion pattern of the grinding bodies from a rolling mode to a combination of rolling and free flight. This transition reduces the number of collisions while simultaneously increasing their force characteristics. An analysis of the changes in total energy loss during “body–body” and “body–chamber” collisions was performed. It was established that as K increases from 1 to 2, the total energy loss during collisions primarily increases due to greater energy loss in “body–body” collision pairs. The developed models and the obtained numerical estimates of the effect of the gear ratio on the energy-force characteristics of collisions can be utilized to design optimized mechanical processing technology in planetary mills.

Keywords: high-energy milling, discrete element method, energy-force characteristics, collisions, motion pattern of grinding bodies

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Prof. A.S. Rogachev for his assistance in organizing and conducting the experimental study. This research was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-29-00889, <https://rscf.ru/project/23-29-00889/>).

For citation: Aborkin A.V., Elkin A.I., Ryabkova V.V., Bugayov A.P., Bobozhanov A.R., Alymov M.I. Influence of gear ratio on the energy-force conditions of grinding body collisions in a planetary mill. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2025;19(1): 5–14. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-5-14>

Введение

Механическая обработка (МО) твердых веществ используется для инициации изменения скорости химических и физико-химических процессов, необходимых для механохимического синтеза, механического легирования, механической активации и т.д. [1]. Обычно МО проводят в атриторах, планетарных, вибрационных и шаровых мельницах. Принцип действия этих устройств основан на многократном импульсном механическом воздействии размольных тел на вещество, которое обеспечивает передачу в него механической энергии [2]. При всем разнообразии видов механического воздействия на вещество в основе лежат удар, сдвиг и их комбинации в разных соотношениях, которые зависят от типа устройства и режима его работы [3]. При этом вид механического воздействия, способствующего меха-

нохимическим превращениям, оказывает явное влияние на их характер [4].

Обработка в планетарных мельницах нашла широкое применение для решения различных технологических задач, состоящих, например, в механическом легировании/активации, синтезе композиционных порошковых смесей, переработке стружечных отходов и т.д. [5–7]. Принимая во внимание различие данных технологических задач, их эффективная реализация хотя и возможна с помощью одного и того же оборудования, в данном случае планетарной мельницы, но очевидно требует использования различных технологических параметров МО. К ним следует отнести форму и размер размольных тел, коэффициент заполнения ими рабочей камеры, отношение массы обрабатываемого вещества к массе размольных тел, передаточное отношение и частоту вращения солнечного колеса. Подбор этих параметров в большинстве

случаев осуществляется эмпирически, методом проб и ошибок, что является весьма трудоемким, а иногда и нереализуемым процессом. Для научно обоснованного их назначения необходимо установление связи между данными параметрами, количеством передаваемой механической энергии и характеристиками обработанного вещества. К последним, в зависимости от задачи, можно отнести гранулометрический и фазовый составы, размер структурных составляющих и т.п. Численное определение передаваемой механической энергии, с учетом перечисленных факторов, влияющих на механику процесса, возможно на основе математического моделирования движения размольных тел, например, с использованием метода дискретных элементов [8–11].

Другим немаловажным направлением исследований является экспериментальное изучение кинематики движения размольных тел в планетарной мельнице в зависимости от параметров МО, которое проводят, например, с помощью высокоскоростной видеосъемки [10; 12]. При этом комплексные расчетно-экспериментальные исследования позволяют дополнить данные о кинематике движения энергосиловыми характеристиками столкновений размольных тел между собой и со стенками рабочей камеры. Это обеспечивает более полное понимание процессов, протекающих при МО, позволяет прогнозировать характеристики получаемого вещества в зависимости от условий обработки и будет способствовать разработке рациональной технологии, обеспечивающей повторяемость получаемых свойств с учетом использования различного оборудования и его масштабируемости.

Цель данной работы состоит в разработке, численной реализации и валидации модели движения размольных тел в планетарной мельнице, а также в исследовании влияния передаточного отношения на характер движения и энергосиловые характеристики столкновения размольных тел.

Описание методик экспериментального и теоретического исследований

При проведении экспериментальной части исследования использовали лабораторную планетарную мельницу «Activator-2S» (машиностроительный завод «Активатор», г. Новосибирск) и высокоскоростную видеокамеру «Phantom Miro M310» (Vision Research Inc., США). Планетарная мельница имеет две цилиндрические рабочие камеры, расположенные вертикально на солнечном колесе. В одну из рабочих камер помещали 12 стальных размольных тел в форме шара диаметром 9 мм. Для ограничения возможности вер-

тикального перемещения размольных тел в рабочей камере высота последней составляла 1,2 диаметра шара. Особенностью конструкции данной мельницы является наличие двух независимых электродвигателей, которые приводят в движение со скоростями W и w солнечное колесо и рабочую камеру соответственно. Управление скоростями разнонаправленного вращения осуществляется с помощью частотных преобразователей. Видеокамера была размещена над мельницей коаксиально вертикальной оси солнечного колеса (см. рис. 1).

Для видеосъемки стальные крышки рабочих камер были заменены на прозрачные. Скорость записи во всех экспериментах была 2000 кадров в секунду. Высокоскоростную съемку проводили для 4-х значений отношения скоростей вращения рабочей камеры и солнечного колеса ($K = w/W$), равных 1,0; 1,2; 1,5; 2,0. При этом варьировали только скорость вращения рабочей камеры, а скорость вращения солнечного колеса во всех опытах была постоянной и составляла 694 об/мин.

В дополнение к экспериментальным исследованиям движения размольных тел выполняли моделирование процесса с использованием метода дискретных элементов. В данном методе динамика поступательного и вращательного движений размольных тел

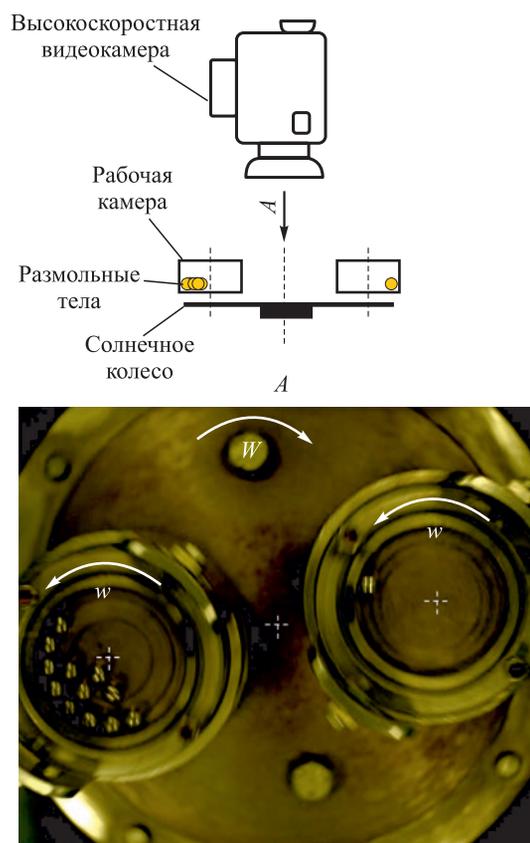


Рис. 1. Схема проведения высокоскоростной видеосъемки

Fig. 1. Schematic of high-speed videography setup

в рабочей камере планетарной мельницы описывается с помощью пошагового алгоритма с постоянным обновлением положения тел и стенок. При этом для каждого i -го размоленного тела решается система из двух уравнений поступательного и вращательного движения, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} m_i \frac{dv_i}{dt} &= m_i g + \sum_{j \neq i}^N \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{F}_i^b, \\ I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} &= \sum_{j \neq i}^N \mathbf{T}_{ij} + \mathbf{T}_i^b + \mathbf{M}_i. \end{aligned} \quad (1)$$

Первое уравнение описывает поступательное движение центра масс размоленных тел. Величины m_i и v_i – масса и скорость i -го тела, t – время, g – ускорение свободного падения. Первое слагаемое в правой части равенства учитывает действие на данное размоленное тело сил гравитации, второе – взаимодействие между телами, а последнее – взаимодействие размоленного тела со стенками рабочей камеры. Начальные скорости поступательного и вращательного движений считаются заданными. Поскольку масса рабочей камеры существенно превышает совокупную массу размоленных тел, можно пренебречь влиянием взаимодействия стенок с телами на движение камеры и считать, что закон движения стенок известен.

Учет вращательного движения размоленных тел в планетарной мельнице обеспечивается вторым уравнением системы (1). Скалярная переменная I_i используется для обозначения момента инерции, а векторные переменные $\boldsymbol{\omega}_i$, \mathbf{T}_{ij} и \mathbf{T}_i^b обозначают угловую скорость и моменты сил, возникающие при взаимодействии данного размоленного тела с другим телом с индексом j либо со стенкой рабочей камеры. Слагаемое \mathbf{M}_i введено для учета сил трения качения, действующих на размоленные тела.

Для учета взаимодействия между i -м и j -м телами введены силы \mathbf{F}_{ij} и моменты сил \mathbf{T}_{ij} , входящие в уравнение (1) под знаком суммы. Суммирование по всем возможным значениям $j \neq i$ позволяет исключить самодействие. При этом учитывается только взаимодействие контактирующих размоленных тел. Для тел, расположенных друг от друга на большем расстоянии, сила взаимодействия полагается равной нулю.

При расчете сил взаимодействия между размоленными телами и их моментов в настоящей работе применялась теория Г. Герца, дополненная теорией сдвига Р. Миндлина (модель Герца–Миндлина) [13]. Характер взаимодействия не может считаться абсолютно упругим, поэтому для учета потерь энергии при столкновении размоленных тел вводится, кроме силы контакта, дополнительная диссипативная сила. Расчет столкновения размоленных тел со стен-

кой рабочей камеры выполняется по аналогичной модели, однако, поскольку радиус рабочей камеры существенно превышает радиус каждого из тел, кривизна поверхности стенки не учитывается.

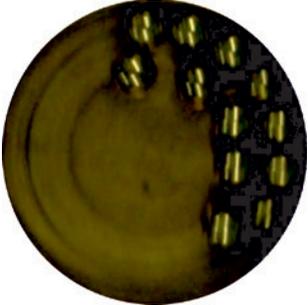
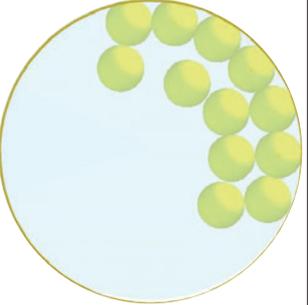
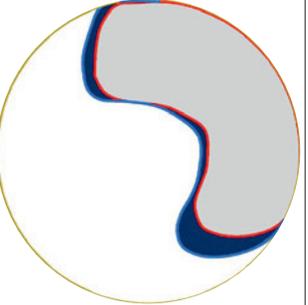
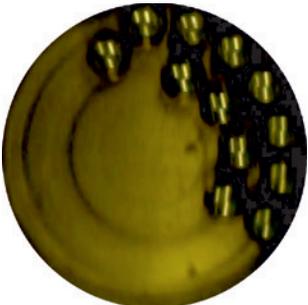
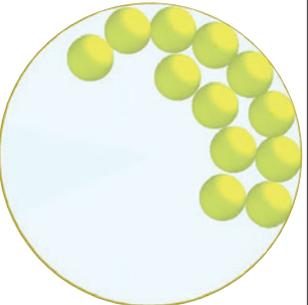
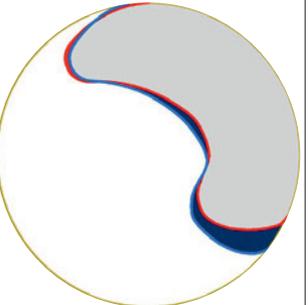
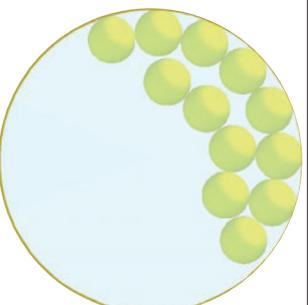
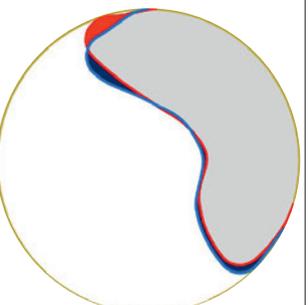
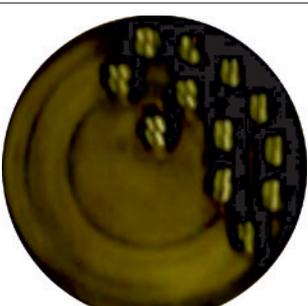
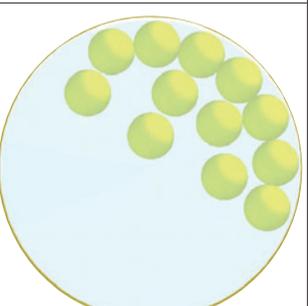
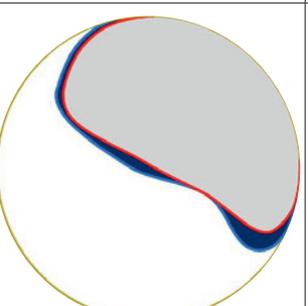
Параметрами модели являются физико-механические характеристики материала размоленных тел и рабочей камеры, а также коэффициенты, характеризующие их контактное взаимодействие. К последним относятся коэффициенты реституции (e_R), статического трения (μ_S) и трения качения (μ_R). Если физико-механические характеристики для большинства конструкционных материалов являются справочными данными, то определение коэффициентов, характеризующих их контактное взаимодействие, представляет собой самостоятельную экспериментальную задачу, которую, например, решали в работах [14–16]. Следует учесть, что данные коэффициенты могут зависеть, в том числе, от размера и правильности формы (отклонения от формы шара) размоленных тел, шероховатости поверхности размоленных тел и рабочей камеры и т.д., а поэтому требуют уточнения, которое в настоящей работе проводили методом подгонки модели под данные эксперимента.

В качестве начального приближения, учитывая рекомендации работ [17; 18], принимали $e_R = 0,85$, $\mu_S = 0,45$ и $\mu_R = 0,02$. Для подгонки была проведена серия численных расчетов, имитирующих условия эксперимента, в которых изменяли значения коэффициентов, характеризующих контактное взаимодействие. В качестве критерия близости экспериментальных и расчетных результатов было принято соответствие картин положения (структуры мгновенных изображений) размоленных тел в рабочей камере. Валидацию модели выполняли путем соотношения площадей экспериментальной и расчетной структур системы размоленных тел для 8 положений рабочей камеры на установившемся режиме работы планетарной мельницы. Результаты подгонки считали удовлетворительными, если расхождение экспериментальных и расчетных данных (Δ) не превышало 15 % для одних и тех же значений коэффициентов, характеризующих контактное взаимодействие.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены типичные мгновенные изображения размоленных тел, полученные экспериментально (столбец «Эксперимент») и путем моделирования (столбец «Модель») для различных вариантов отношения скоростей вращения рабочей камеры и солнечного колеса. Кроме того, в табл. 1 показаны изображения площадей экспериментальной и расчетной структур многочастичной системы (столбец «Сравнение»). И, наконец, в табл. 1 приведены усредненные для 8 положений рабочей камеры числовые

Таблица 1. Сопоставление результатов эксперимента и расчетных данных
 Table 1. Comparison of experimental and simulated results

$K = w/W$	Эксперимент	Модель	Сравнение	Δ , %
1,0				12,4
1,2				11,9
1,5				9,1
2,0				12,2

данные о несоответствии этих площадей (Δ), являющиеся погрешностью разработанной модели и характеризующие ее адекватность.

Анализ представленных в табл. 1 результатов эксперимента и расчетных данных позволяет сделать вывод об их разумном соответствии. Расхождение не превышает 13 %. При этом подгоночные параметры были едины для различных вариантов отношения скоростей вращения рабочей камеры и солнечного колеса. Значения коэффициентов (подгоночных параметров), характеризующих контактное взаимо-

действие, составили $e_R = 0,75$, $\mu_S = 0,21$ и $\mu_R = 0,023$. Необходимо отметить, что если значения e_R и μ_R достаточно близки или совпадали с используемыми при моделировании в работах [19; 20], то значение μ_S значительно отличалось (более чем в 3 раза). Вместе с тем параметр μ_S оказывает существенное влияние не только на характер движения размольных тел [10], но и на количественные значения энергосиловых характеристик столкновений, что в значительной мере определяет их достоверность. Таким образом, разработанная модель является адекватной и может

быть использована для изучения влияния передаточного отношения на характер движения размольных тел в ходе высокоэнергетического шарового размола и энергосиловые параметры процесса обработки.

Далее с помощью разработанной модели было изучено влияние передаточного отношения на характер движения размольных тел в рабочей камере. Анализ результатов моделирования показывает, что изменение величины K от 1,0 до 1,5 практически не влияет на кинематику движения размольных тел. Напротив, при увеличении K до 2,0 характер движения размольных тел изменяется значительно. В первом случае, при $K = 1,0 \div 1,5$, реализуется режим движения размольных тел, при котором происходит циклическое перекачивание тел с первого на второй ряд. При этом обработка материала может происходить как истиранием между стенкой рабочей камеры и размольными телами, так и соударениями размольных тел при перекачивании. Во втором случае, при $K = 2,0$, появляются размольные тела, которые свободно меняют свое положение относительно центра рабочей камеры. Поэтому можно наблюдать трехряд-

ное перекачивание, которое реализуется путем одновременного забрасывания на второй ряд двух и более размольных тел, что ведет к формированию третьего ряда (см. табл. 1). Т.е. кроме режима перекачивания частично реализуется и режим свободного полета размольных тел, при котором некоторые размольные тела отделяются от стенки и выбрасываются в свободное пространство рабочей камеры, осуществляя свободный полет до момента столкновения с другим размольным телом или стенкой рабочей камеры. Для такого режима движения характерны соударения наибольшей интенсивности. Однако количество соударений по сравнению с режимом перекачивания, по всей видимости, должно снижаться.

Также были получены оценки влияния передаточного отношения на изменение силовых характеристик контактного взаимодействия размольных тел друг с другом и со стенками рабочей камеры. На рис. 2 представлены нормированные расчетные данные о распределении количества столкновений по силе сжатия и усилию сдвига для различных передаточных отношений.

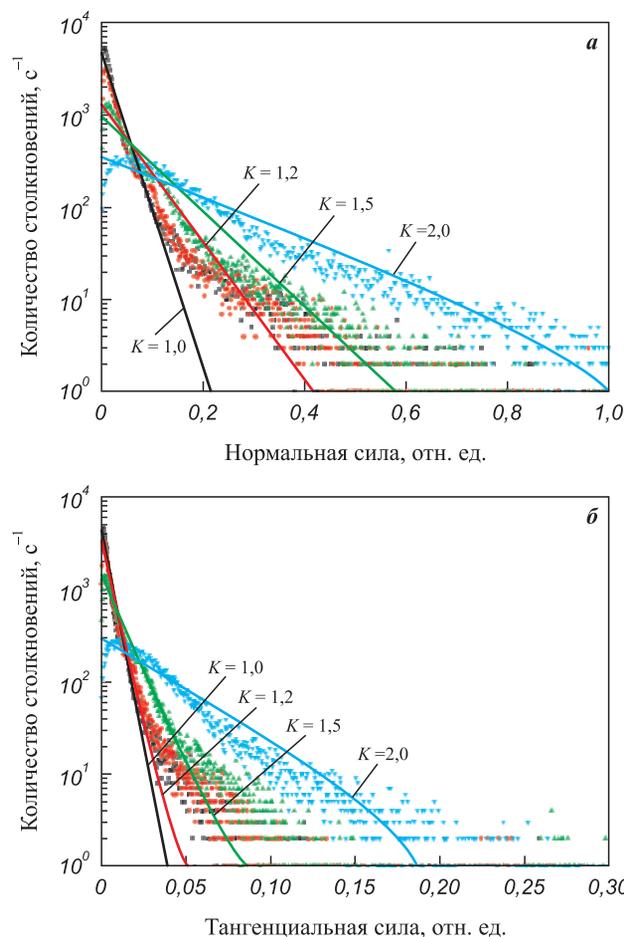


Рис. 2. Изменение нормальной (а) и тангенциальной (б) силы столкновений размольных тел при моделировании с различными передаточными отношениями

Fig. 2. Changes in normal (a) and tangential (b) collision forces of grinding bodies at different gear ratios

Таблица 2. Распределение столкновений (%) по силе столкновений

Table 2. Distribution of collisions (%) by collision force

K	Нормальная сила			Тангенциальная сила		
	$F_n < 0,01$	$0,01 < F_n < 0,1$	$F_n > 0,1$	$F_t < 0,01$	$0,01 < F_t < 0,1$	$F_t > 0,1$
1,0	32,5	61,9	5,6	31,4	63,2	5,4
1,2	24,5	63,6	11,9	24,5	66,3	9,2
1,5	12,1	67,8	20,1	13,0	67,1	19,9
2,0	2,4	42,3	55,3	1,9	38,7	59,4

Можно видеть, что увеличение передаточного отношения способствует росту нормальной силы при столкновениях (см. рис. 2, а). Причем изменение K от 1 до 2 ведет к повышению максимальной нормальной силы при столкновениях в ~5 раз. При этом наблюдается значительная дифференциация столкновений по усилиям. Так, если принять условное деление общего числа столкновений, в зависимости от усилия, на низкоинтенсивные ($F < 0,01$), среднеинтенсивные ($0,01 < F < 0,1$) и высокоинтенсивные ($F > 0,1$) и провести их сопоставление для различных передаточных отношений (см. табл. 2), то можно заметить, что в случаях $K = 1,0 \div 1,5$ основная доля столкновений является среднеинтенсивной. Причем увеличение доли таких столкновений для данного интервала изменения K не превышает 6 %.

В то же время происходит перераспределение столкновений по интенсивности. Так, например, при $K = 1,0$ установлено, что 32,5 % столкновений являются низкоинтенсивными и только 5,6 % – высокоинтенсивными. При $K = 1,5$ доля низкоинтенсивных столкновений уже составляет 12,1 %, а высокоинтенсивных – 20,1 %. Однако с увеличением K до 2,0, т.е. с изменением типа движения размольных

тел, доля среднеинтенсивных столкновений уменьшается до 42,3 %. Напротив, доля высокоинтенсивных столкновений возрастает и составляет уже 55,3 %, а количество таких столкновений заметно снижается. Качественно схожую картину наблюдали и для усилия сдвига (см. рис. 2, б). Важным является то, что для $K = 1,0 \div 1,5$ основная масса столкновений является среднеинтенсивной. И если предположить, что этих усилий достаточно для создания необходимого поля механических напряжений, то активационная обработка частиц вещества может быть одинаково эффективной и при $K = 1,0$ и при $K = 1,5$, а обработка при $K = 2,0$, несмотря на превалирование столкновений с высокой интенсивностью и учитывая снижение их количества, может быть менее эффективной, чем при $K = 1,0 \div 1,5$. По всей видимости, режим $K = 2,0$ более целесообразно использовать при обработке крупно-размерных частиц вещества, требующей больших усилий для его деформирования и фрагментирования.

На рис. 3 представлены нормированные данные, характеризующие суммарную потерю энергии при столкновениях «тело–тело» и «тело–камера» для разных передаточных отношений и изменение количества столкновений.

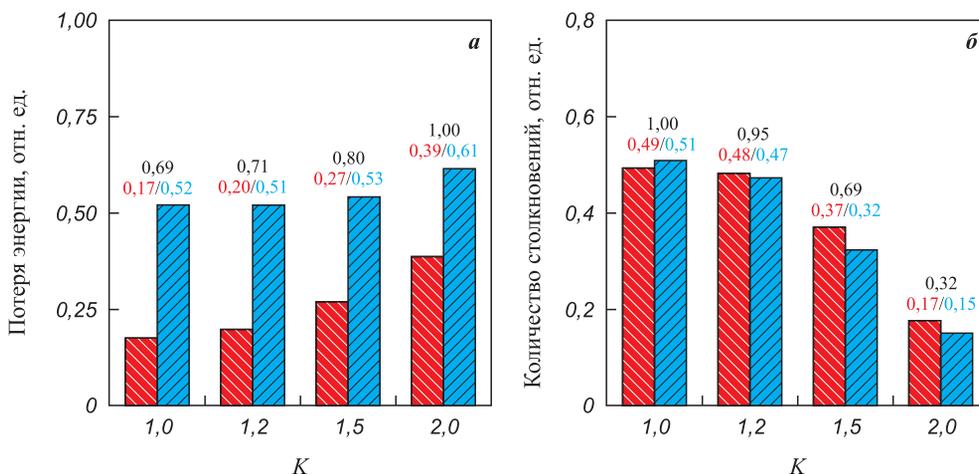


Рис. 3. Суммарная потеря энергии при столкновениях «тело–тело» (■) и «тело–камера» (■) (а) и изменение количества столкновений (б) для разных передаточных отношений

Fig. 3. Total energy loss during “body–body” (■) and “body–chamber” (■) collisions (a) and changes in collision count (b) for different gear ratios

Анализ представленных графических зависимостей показывает, что с ростом передаточного отношения K от 1,0 до 2,0 суммарная потеря энергии при столкновениях «тело–тело» увеличивается на ~30 % (см. рис. 3, а). Однако потеря энергии при столкновениях «тело–камера» для передаточных отношений K от 1,0 до 1,5 практически не изменяется, а для случая $K = 2,0$ увеличивается лишь на ~13 %. То есть рост суммарной потери энергии при столкновениях в основном происходит за счет изменения (увеличения) потери энергии при столкновениях пар «тело–тело».

Количество столкновений с ростом передаточного соотношения ожидаемо уменьшается (см. рис. 3, б). Причем если при $K = 1,0$ и 1,2 оно снижается незначительно, то при достижении $K = 1,5$ и, далее, $K = 2,0$ – в ~1,5 и ~3,1 раза соответственно. Такое сокращение количества столкновений может приводить к уменьшению вероятности возникновения контактов размольных тел с обрабатываемым веществом, тем самым снижая эффективность обработки. Таким образом, увеличение передаточного отношения ведет к значительному снижению количества столкновений размольных тел с одновременным ростом удельной потери энергии столкновения, который, несмотря на падение количества столкновений, обеспечивает повышение суммарной потери энергии столкновений. Интересным является то, что при обработке смесей микрометрических частиц, с высоким отношением массы размольных тел к массе обрабатываемого вещества, частицы вещества имеют тенденцию собираться у стенки из-за их способности проходить через пустоты между размольными телами [19]. Поэтому, несмотря на увеличение суммарной потери энергии при столкновениях, к которому ведет рост передаточного отношения, использование режимов обработки с $K = 2,0$ может являться менее эффективным, чем при низких K , так как столкновения «тело–тело» не вносят вклад в обработку, а количество столкновений «тело–камера», несмотря на рост их интенсивности, существенно снижается. По всей видимости, повышение эффективности обработки порошковых смесей за счет использования больших значений K может быть достигнуто в случае обработки с низким отношением массы размольных тел к массе вещества, когда частицы вещества располагаются не только у стенок рабочей камеры, но и вокруг ее центра, что обеспечит более эффективное использование столкновений «тело–тело». Другим вариантом рационального использования режима обработки при $K = 2,0$ является обработка крупноразмерных частиц вещества миллиметрового размера, когда необходимы высокие усилия для деформирования частиц, например при обработке гранульных или стружечных материалов.

Заключение

Разработана, численно реализована и валидирована модель движения размольных тел в планетарной мельнице «Activator-2S». Путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных определены параметры модели, обеспечивающие ее адекватность. Анализ модели позволил установить, что с ростом передаточного отношения K в диапазоне от 1,0 до 2,0 снижается доля малоподвижных размольных тел и происходит изменение характера их движения с режима перекачивания на режим перекачивания и свободного полета. Это ведет к увеличению силовых характеристик столкновений размольных тел с одновременным уменьшением их количества. При этом, несмотря на значительную дифференциацию столкновений по усилиям, доля среднеинтенсивных столкновений при K от 1,0 до 1,5 практически не изменяется, а при дальнейшем увеличении K до 2,0 – снижается, повышая долю высокоинтенсивных столкновений. Суммарные потери энергии при столкновениях при изменении K от 1,0 до 2,0 увеличиваются на ~30 %. Однако потери энергии столкновений пары «тело–камера» для K от 1,0 до 1,5 не изменяются, а рост суммарных потерь энергии при столкновениях происходит за счет повышения доли потери энергии при столкновениях пар «тело–тело». Учитывая данные о влиянии передаточного отношения на изменение характера столкновений и энергосиловые характеристики механической обработки, можно рекомендовать режим при K от 1,0 до 1,5 для механической обработки микронных частиц вещества с большим отношением массы размольных тел к массе вещества. Режим с $K = 2,0$, по всей видимости, будет более рационален в случае механической обработки крупных частиц вещества при решении задачи фрагментирования компонентов смеси. Модель может найти применение для оценки энергосиловых характеристик процесса обработки в планетарных мельницах на этапе разработки технологии.

Список литературы / References

1. Зырянов В.В. Механохимический синтез сложных оксидов. *Успехи химии*. 2008;77(2):107–137. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n02ABEH003709>
Zyryanov V.V. Mechanochemical synthesis of complex oxides. *Russian Chemical Reviews*. 2008;77(2):105–135. <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n02ABEH003709>
2. Michalchuk A.A.L., Boldyreva E.V., Belenguer A.M., Emmerling F., Boldyrev V.V. Tribochemistry, mechanical alloying, mechanochemistry: What is in a name? *Frontiers in Chemistry*. 2021;9:685789. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.685789>
3. Лапшин О.В., Болдырева Е.В., Болдырев В.В. Роль смешения и диспергирования в механохимичес-

- ком синтезе (обзор). *Журнал неорганической химии*. 2021;66(3):402–424.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X21030119>
- Lapshin O.V., Boldyreva E.V., Boldyrev V.V. Role of mixing and milling in mechanochemical synthesis (review). *Inorganic Materials and Nanomaterials*. 2021;66(3):433–453. <https://doi.org/10.1134/S0036023621030116>
4. Туманов И.А., Ачкасов А.Ф., Мызь С.А., Болдырева Е.В., Болдырев В.В. Качественно различное влияние сдвиговой и ударной механической нагрузки на механохимическую сокристаллизацию пироксикама и янтарной кислоты. *Доклады Академии наук*. 2014;457(6):670–675. <https://doi.org/10.7868/S0869565214240141>
 Tumanov I.A., Achkasov A.F., Myz S.A., Boldyreva E.V., Boldyrev V.V. Different effect of impact and shear mechanical treatment on mechanochemical cocrystallization of piroxicam and succinic acid. *Doklady Chemistry*. 2014;457(2):154–159.
<https://doi.org/10.1134/S0012500814080059>
 5. Suryanarayana C. Mechanical alloying: A critical review. *Materials Research Letters*. 2022;10(10):619–647.
<https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2075243>
 6. Рогачёв А.С., Мукасян А.С. Горение гетерогенных наноструктурных систем (обзор). *Физика горения и взрыва*. 2010;(3):3–30.
 Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Combustion of heterogeneous nanostructural systems (review). *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010;46(3):243–266.
<https://doi.org/10.1007/s10573-010-0036-2>
 7. Wei L.K., Bin Abd. Rahim S.Z., Al Bakri Abdullah M.M., Yin A.T.M., Ghazali M.F., Omar M.F., Nemes O., Sandu A.V., Vizureanu P., Abdellah A.E.-h. Producing metal powder from machining chips using ball milling process: A Review. *Materials*. 2023;16(13):4635.
<https://doi.org/10.3390/ma16134635>
 8. Burmeister C., Titscher L., Breitung-Faes S., Kwade A. Dry grinding in planetary ball mills: Evaluation of a stressing model. *Advanced Powder Technology*. 2018;29(1):191–201. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.11.001>
 9. Santhanam P.R., Dreizin E.L. Predicting conditions for scaled-up manufacturing of materials prepared by ball milling. *Powder Technology*. 2012;221:403–411.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.01.037>
 10. Rosenkranz S., Breitung-Faes S., Kwade A. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills. *Powder Technology*. 2011;212:224–230.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.05.021>
 11. Kozawa T., Fukuyama K., Kushimoto K., Ishihara S., Kano J., Kondo A., Naito M. Effect of ball collision direction on a wet mechanochemical reaction. *Scientific Reports*. 2021;11(1):210.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-80342-w>
 12. Rogachev A.S., Moskovskikh D.O., Nepapushev A.A., Sviridova T.A., Vadchenko S.G., Rogachev S.A., Mukasyan A.S. Experimental investigation of milling regimes in planetary ball mill and their influence on structure and reactivity of gasless powder exothermic mixtures. *Powder Technology*. 2015;274(2):44–52.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.009>
 13. Mindlin R.D., Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique force. *Journal of Applied Mechanics*. 1953;20(3):327–344. <https://doi.org/10.1115/1.4010702>
 14. Aryaei A., Hashemnia K., Jafarpur K. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*. 2010;37(10):1037–1044.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.04.005>
 15. Hlosta J., Žurovec D., Rozbroj J., Ramírez-Gómez Á., Nečas J., Zegzulka J. Experimental determination of particle–particle restitution coefficient via double pendulum method. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;135:222–233.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.05.016>
 16. Hlosta J., Jezerská L., Rozbroj J., Žurovec D., Nečas J., Zegzulka J. DEM investigation of the influence of particulate properties and operating conditions on the mixing process in rotary drums: Part 1 – Determination of the DEM parameters and calibration process. *Processes*. 2020;8(2):222. <https://doi.org/10.3390/pr8020222>
 17. Gusev V.G., Sobol'kov A.V., Aborkin A.V. Determination of the coefficient of restitution upon contact of a steel ball with aluminum and steel surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131(3):032087.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032087>
 18. Гусев В.Г., Соболюков А.В., Аборкин А.В., Алымов М.И. Моделирование энергосиловых параметров обработки в планетарной мельнице и оценка их влияния на размер частиц композиционного порошка сплав АМг2/графит. *Металлы*. 2019;(1):27–34.
 Gusev V.G., Sobol'kov A.V., Aborkin A.V., Alymov M.I. Simulation of the energy–force parameters of planetary ball mill processing and estimation of their influence on the particle size in an AMg2 alloy/graphite composite powder. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019;(1):24–30.
<https://doi.org/10.1134/S0036029519010063>
 19. Hirose F., Iwasaki T. Dependence of the dissipated energy of particles on the sizes and numbers of particles and balls in a planetary ball mill. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021;167:84–95.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.12.024>
 20. Capece M., Davé R.N., Bilgili E. On the origin of non-linear breakage kinetics in dry milling. *Powder Technology*. 2015;272:189–203.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.11.040>

Сведения об авторах



Артеми́й Вита́льевич Аборкин – к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ)

 **ORCID:** 0000-0003-4979-7164

 **E-mail:** aborkin@vlsu.ru

Алексей Иванович Елкин – к.т.н., директор Института машиностроения и автомобильного транспорта ВлГУ

 **ORCID:** 0000-0001-5842-9625

 **E-mail:** elkin@vlsu.ru

Варвара Викторовна Рябкова – мл. науч. сотрудник ВлГУ

 **ORCID:** 0009-0000-5757-6922

 **E-mail:** VVRyabkova@mail.ru

Александр Павлович Бугаёв – магистрант ВлГУ

 **ORCID:** 0009-0006-0441-5264

 **E-mail:** bugaev689@gmail.com

Анис Рахмонович Бобожанов – мл. науч. сотрудник, аспирант Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук (ИСМАН)

 **ORCID:** 0009-0008-7021-7156

 **E-mail:** bobozhanov.anis@mail.ru

Михаил Иванович Альмов – д.т.н., член-корр. РАН, директор ИСМАН

 **ORCID:** 0000-0001-6147-5753

 **E-mail:** alymov@ism.ac.ru

Information about the Authors

Artemiy V. Aborkin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of mechanical engineering technology of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU)

 **ORCID:** 0000-0003-4979-7164

 **E-mail:** aborkin@vlsu.ru

Aleksey I. Elkin – Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Mechanical Engineering and Automobile Transport of VISU

 **ORCID:** 0000-0001-5842-9625

 **E-mail:** elkin@vlsu.ru

Varvara V. Ryabkova – Junior Researcher at the VISU

 **ORCID:** 0009-0000-5757-6922

 **E-mail:** VVRyabkova@mail.ru

Aleksandr P. Bugayov – Postgraduate Student of VISU

 **ORCID:** 0009-0006-0441-5264

 **E-mail:** bugaev689@gmail.com

Anis R. Bobozhanov – Junior Researcher, Graduate Student at the A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN)

 **ORCID:** 0009-0008-7021-7156

 **E-mail:** bobozhanov.anis@mail.ru

Mikhail I. Alymov – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the ISMAN

 **ORCID:** 0000-0001-6147-5753

 **E-mail:** alymov@ism.ac.ru

Вклад авторов



А. В. Аборкин – определение цели работы, разработка методологии исследования, участие в обсуждении результатов, рецензирование и редактирование.

А. И. Елкин – определение цели работы, разработка и валидация дискретно-элементной модели, написание текста статьи, участие в обсуждении результатов.

В. В. Рябкова – участие в разработке дискретно-элементной модели, обработка данных численного эксперимента, участие в обсуждении результатов.

А. П. Бугаёв – проведение численных экспериментов.

А. Р. Бобожанов – проведение экспериментального исследования.

М. И. Альмов – участие в обсуждении результатов, рецензирование и редактирование.

Contribution of the Authors

A. V. Aborkin – defined the research objectives, developed the research methodology, participated in result discussions, and reviewed and edited the manuscript

A. I. Elkin – defined the research objectives, developed and validated the discrete element model, drafted the manuscript, and participated in result discussions.

V. V. Ryabkova – developed the discrete element model, conducted numerical experiments, participated in result discussions.

A. P. Bugayov – conducting numerical experiments.

A. R. Bobozhanov – performed the experimental study.

M. I. Alymov – participated in result discussions and reviewed and edited the manuscript.

Статья поступила 15.10.2024 г.
Доработана 26.11.2024 г.
Принята к публикации 29.11.2024 г.

Received 15.10.2024
Revised 26.11.2024
Accepted 29.11.2024