

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СМЕСИ  
РАЗНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ В СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ  
ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ**

**Д.А. Осипов, В.П. Жуков, В.Е. Мизонов, А.В. Огурцов**

Дмитрий Андреевич Осипов, Владимир Павлович Жуков \*, Вадим Евгеньевич Мизонов, Антон Валерьевич Огурцов

Кафедра прикладной математики, Ивановский государственный энергетический университет, Рабфаковская, 34, Иваново, Российская Федерация, 153003

E-mail: dima-link@mail.ru, zhukov-home@yandex.ru \*, mizonov46@mail.ru, ogurtsovav@mail.ru

*Обоснована актуальность задачи по определению гранулометрического состава каждого компонента смеси при их совместном измельчении, классификации и смешивании. Проведен анализ существующих методик по определению гранулометрического состава каждого компонента смеси с использованием маркеров различных типов (радиоактивные, цветные и др.), которые подходят далеко не для всех материалов в силу технологических, финансовых или санитарных ограничений. Обоснована актуальность разработки простой и доступной методики исследования гранулометрии компонентов смеси с использованием растворимых маркеров, которая может быть применена в случае избирательного растворения в выбранном растворителе одного из компонентов смеси. Для проведения экспериментальных исследований использована лабораторная мельница ударного действия ОР ВТИ, для проведения идентификации модели измельчения смеси компонентов использованы данные, полученные в ходе специальных экспериментальных исследований. В результате исследований предложена и апробирована методика определения гранулометрического состава для смеси двух компонентов, один из которых полностью растворяется в воде, а второй компонент при этом в воде не растворяется. Разработанная методика использована для исследования кинетики совместного измельчения компонентов смеси разнопрочных компонентов в мельнице циркулирующего кипящего слоя. Проведенные исследования позволили развить концепцию моделирования селективного измельчения смеси разнопрочных компонентов. Выполненный расчетный анализ показал, что предложенная ранее модель измельчения смеси компонентов с учетом полученных экспериментальных данных позволяет с приемлемой для инженерных расчетов точностью описывать процесс селективного измельчения смеси разнопрочных компонентов, что делает возможным проведение практической оценки эффективности обогащения целевых компонентов и определение оптимальных технологических условий разделения смеси разнопрочных компонентов.*

**Ключевые слова:** смесь, компоненты, гранулометрия, сыпучий материал, селективное измельчение, ударное разрушение, струйная мельница, циркулирующий кипящий слой, математическая модель, идентификация, классификация, обогащение

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF JOINT GRINDING OF DISSIMILAR COMPONENTS IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED JET MILL

D.A. Osipov, V.P. Zhukov, V.E. Mizonov, A.V. Ogurtsov

Dmitriy A. Osipov, Vladimir P. Zhukov \*, Vadim E. Mizonov, Anton V. Ogurtsov

Department of Applied Mathematics, Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russia

E-mail: dima-link@mail.ru, zhukov-home@yandex.ru \*, mizonov46@mail.ru, ogurtsovav@mail.ru

*At joint grinding, classification and mixing of dissimilar particulate solids, not only the total content of each in a mixture is the point of researcher's interest but also the particle size distribution in each component. It is particularly important for enrichment and purification of components at their joint grinding and classification. Tracers of different type (radioactive, colored, etc.) are commonly used for this purpose. However, such methods are available not for any materials due to technological, financial and sanitary limitations. An alternative simple and easy available approach to investigate the particle size distributions in a mixture is proposed. It is based on application of soluble tracers and can be used in the case of selective solution of one of the components in a chosen solvent. Such method to define the particle size distribution can be interesting for the chemical and other industries. A laboratory impact mill was used for experimentation and identification of the model of joint grinding of a components mixture. This part of the research allowed obtaining and testing the method to define the particle size distributions in the binary mixture of components one of which was solvable in water, and another one was not. The developed method was used for grinding kinetics of joint grinding of two dissimilar components. The conducted research allowed developing a conception of modeling of the selective grinding of dissimilar components mixture. The computational analysis showed that the proposed model with calibrating parameters obtained from the experiments allows describing the process of selective grinding of a dissimilar components mixture with the accuracy that is acceptable for engineering practice. It allows using the model for practical estimation of the objective components enrichment and defining the optimal conditions for dissimilar components separation.*

**Key words:** mixture, components, particle size distribution, particulate solids, selective grinding, impact breakdown, fluidized bed jet mill, circulating fluidized bed, mathematical model, identification, classification, enrichment

### Для цитирования:

Осипов Д.А., Жуков В.П., Мизонов В.Е., Огурцов А.В. Расчетно-экспериментальное исследование измельчения смеси разнородных компонентов в струйной мельнице циркулирующего кипящего слоя. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 1. С. 98–106

### For citation:

Osipov D.A., Zhukov V.P., Mizonov V.E., Ogurtsov A.V. Computational and experimental study of joint grinding of dissimilar components in a circulating fluidized bed jet mill. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 1. P. 98–106

## ВВЕДЕНИЕ

В химической индустрии часто приходится иметь дело со смесью различных порошкообразных материалов, частицы которых могут существенно различаться по крупности. Крупность зерен во многом определяет удельную поверхность и соответственно интенсивность протекания как химических, так и тепломассообменных процессов [1-2]. Возможность контроля и управления этими процессами во многом связана с оценкой гранулометрии как всей смеси, так и отдельных ее компонентов. Особую актуальность приобретает проблема гранулометрии компонентов смеси в

процессах очистки или обогащения компонентов смеси при их совместном измельчении, когда результаты измельчения во многом определяют эффективность процесса обогащения целевого компонента [3-5]. Различная прочность компонентов смеси приводит к тому, что после измельчения частицы более прочного компонента оказываются более крупными по сравнению с частицами менее прочного компонента смеси. Классификация частиц такой смеси по крупности позволяет обогатить готовый продукт целевым компонентом [6]. Определение гранулометрии компонентов и выбор на ее основе условий для эффективного разделения смеси является актуальной задачей хими-

ческой, строительной и смежных отраслей промышленности.

Целью данного исследования является разработка методики гранулометрии компонентов смеси для создания на ее основе эмпирического обеспечения моделей селективного измельчения.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- разработка методики определения гранулометрии компонентов смеси;
- проведение тестирования разработанной методики гранулометрии компонентов смеси;
- проведение экспериментальных исследований измельчения смеси разнопрочных компонентов в лабораторной мельнице ударного действия с использованием предложенной методики;
- проведение параметрической идентификации ранее разработанной математической модели селективного измельчения с привлечением полученных экспериментальных результатов;
- выполнение расчетных исследований процесса селективного измельчения в струйной мельнице циркулирующего кипящего слоя для оценки эффективности обогащения ключевого компонента смеси.

Объектом исследования является модель селективного измельчения компонентов смеси.

Предметом исследования является разработка методики гранулометрии компонентов смеси, один из которых растворяется, а второй практически не растворяется в выбранном растворителе, разработка на основе этой методики эмпирического обеспечения модели селективного измельчения в струйной мельнице циркулирующего кипящего слоя, оценка эффективности обогащения ключевого компонента смеси.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На первом этапе исследования разрабатывается методика гранулометрии компонентов смеси, называемая далее «методикой растворимых маркеров». Данная методика применима для анализа смеси, состоящей из двух компонентов, один из которых растворяется, а второй – не растворяется в выбранном растворителе. При разработке методики в качестве растворителя выбрана вода, в качестве растворимого компонента – сахарный песок, в качестве нерастворимого компонента – кварцевый песок.

Алгоритм определения гранулометрического состава каждого компонента включает следующие этапы. Сначала проводится ситовой анализ крупности исходной смеси компонентов, за-

тем смесь помещается в воду. При интенсивном перемешивании сахарный песок в воде растворяется, раствор фильтруется, а нерастворенный осадок сушится и рассеивается на комплекте сит. После этого гранулометрический состав растворенного компонента определяется расчетным путем из баланса массы отдельных фракций.

Принципиальная оценка возможности использования методики растворимых маркеров и ее отладка были проведены на тестовых опытах, идея которых заключалась в использовании двух компонентов с предварительно определенными, известными гранулометрическими составами. После перемешивания этих компонентов полученную смесь рассеивали на комплекте сит для определения ее гранулометрического состава. Затем проводили анализ гранулометрии компонентов смеси согласно методике растворимых маркеров, а полученные гранулометрические составы компонентов сравнивали с исходными гранулометрическими составами. В ходе отладки методики подбирались такие режимы промывки и сушки компонентов смеси, при которых обеспечивалось наименьшее суммарное отклонение результатов гранулометрии компонентов до и после проведения тестового испытания.

В качестве исходного материала для опытов использовалась фракция с размером частиц крупнее 1 мм. Масса навески для опыта составляла 15,00 г, точность определения массы навески – 0,01 г. Рассев анализируемой навески смеси и компонентов выполнялся на комплекте сит с постепенно уменьшающимися размерами ячеек  $\delta$ , мм: 1; 0,63; 0,5; 0,315; 0,25; 0,16; 0,1; 0.

Отдельно следует отметить, что в ходе тестирования методики после сушки остатка на фильтре наблюдалось слипание частиц кварцевого песка в достаточно прочные агломераты. Наличие таких агломератов в высушенном порошке приводило к заметному искажению результатов ситового анализа. Было сделано предположение, что слипание частиц в агломераты обусловлено образованием сахарной пленки на частицах кварцевого песка при их высушивании. Для предотвращения образования на поверхности частиц кварцевого песка сахарной пленки предложено добавлять в растворитель поверхностно-активное вещество (ПАВ). Проведенная экспериментальная проверка подтвердила правильность сделанного предположения о механизме образования агломератов. Результаты проведения тестовых исследований в рамках предложенной методики в виде гранулометрических составов исходных компонентов до

смешивания, после смешивания, сушки и восстановления их по балансовым соотношениям приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Результаты ситового анализа компонентов смеси до и после промывания и сушки**

**Table 1. Results of the sieve analysis of the mixture components before and after washing and drying**

Размер сита, δ, мм	Кварцевый песок, R, %		Сахарный песок, R, %	
	до	после	до	после
1	1,34	1,21	0,00	0,00
0,63	4,54	4,37	6,00	5,30
0,5	11,42	11,37	37,63	35,84
0,315	28,44	29,14	73,32	73,69
0,25	54,27	53,90	89,73	91,68
0,16	75,83	71,13	95,86	95,30
0,1	97,00	96,57	99,93	98,66
0,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Сравнение гранулометрических составов порошков до и после испытаний в рамках предложенной методики растворимых маркеров показало, что среднее по всем ситам отклонение гранулометрических составов кварцевого и сахарного песка до и после опыта составило 0,64 и 0,25 % соответственно. Приведенные результаты позволяют сделать выводы о приемлемой погрешности полученных результатов, значения которой не превышают погрешности ситового анализа отдельных компонентов, во-первых, и о возможности использования указанной методики при проведении экспериментальных исследований, во-вторых.

Дополнительные экспериментальные исследования, проведенные с целью отладки методики растворимых маркеров, позволили разработать следующий регламент ее проведения:

- 1) Подготовка навески смеси компонентов и проведение ее ситового анализа.
- 2) Помещение навески в стеклянную емкость с водой.
- 3) Добавление в емкость с водой при активном перемешивании поверхностно-активного вещества для предотвращения образования пленки сахара на частицах песка.
- 4) Повторение пунктов 2 и 3 несколько раз до полного растворения сахара. Последняя промывка водой производится без добавления ПАВ.
- 5) После растворения сахара и удаления ПАВ раствор фильтруется, а остаток на фильтре высушивается и просеивается на комплекте сит.
- 6) По результатам гранулометрического

анализа смеси компонентов и остатка на фильтре по балансу массы каждой фракции рассчитывается гранулометрический состав растворимого компонента смеси.

На следующем этапе исследований представленная методика использовалась при изучении кинетики измельчения смеси компонентов в лабораторной мельнице ударного действия [1]. Эскиз данной мельницы представлен на рис. 1. При проведении опытов в размольную камеру 2 помещалась навеска измельчаемого материала массой 15 г, состоящая из смеси сахара и кварцевого песка. Размольный стержень 5 сбрасывался с заданной высоты на приготовленную навеску. Известная масса стержня и замеренная высота его сбрасывания позволяют оценить подведенную к навеске энергию. Стержень сбрасывался в каждом опыте 12 раз с перемешиванием навески после каждого сбрасывания для исключения уплотнения слоя. После проведения серии сбрасываний выполнялся рассев продуктов разрушения смеси по методике растворимых маркеров.

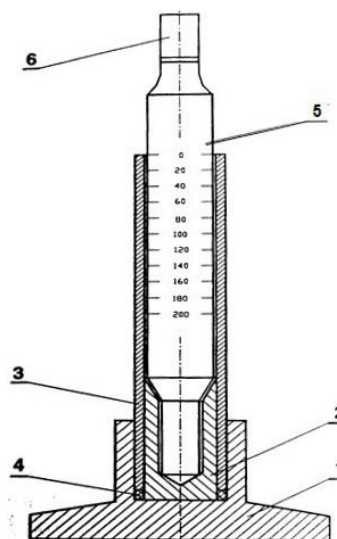


Рис. 1. Общий вид прибора ОР ВТИ: 1 – подставка; 2 – размольная камера; 3 – направляющая трубка; 4 – выверочное кольцо; 5 – размольный стержень; 6 – дополнительный груз к размольному стержню

Fig. 1. Scheme of the lab falling body impact mill: 1 - stand; 2 - grinding chamber; 3 - directing tube; 4 - check ring; 5 - grinding rod; 6 - additional weight to the grinding rod

Результаты экспериментальных исследований в виде зависимости остатков на контрольных ситах сахарного песка после измельчения от состава смеси представлены на рис. 2. Следует отметить, что на результаты измельчения кварцевого песка состав смеси влиял достаточно слабо. При этом крупность измельченного сахарного песка от состава исходной смеси зависела существенно.

Анализ приведенных результатов показывает, что при варьировании состава смеси содержание крупных и мелких фракций сахара после измельчения практически не изменялось, а содержание промежуточных фракций изменялось весьма существенно на 30-40%.

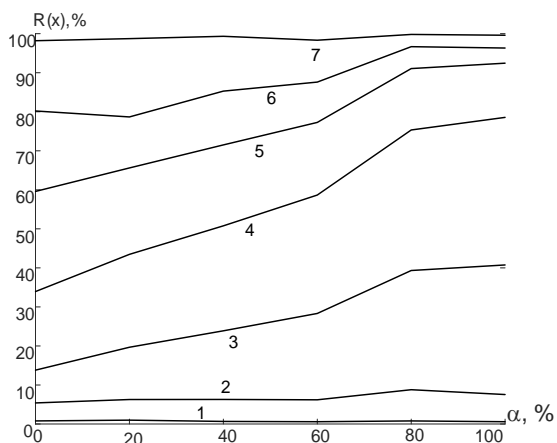


Рис. 2. Гранулометрические составы продуктов измельчения в виде прохода через контрольное сито 1-1; 2-0,63; 3-0,5; 4-0,315; 5-0,25; 6-0,16; 7-0,1 мм от доли сахарного песка в бинарной смеси ( $\alpha$ )

Fig. 2. The values of cumulative undersize in the ground material as a function of sugar content ( $\alpha$ ): 1-1; 2-0.63; 3-0.5; 4-0.315; 5-0.25; 6-0.16; 7-0.1 mm

Приведенные результаты показывают, что методика растворимых маркеров может быть использована для исследования кинетики измельчения смеси компонентов при их совместном измельчении.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Разработанная методика позволяет в лабораторных условиях определять параметры прочностных характеристик компонентов смеси для возможного их дальнейшего использования при проведении расчета на промышленных и полупромышленных установках. Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты тестовых лабораторных испытаний были, в частности, использованы при проведении расчетных исследований измельчения смеси в струйной мельнице циркулирующего кипящего слоя.

На рис. 3 представлен эскиз (а) и расчетная схема потоков в установке (б) со струйной мельницей циркулирующего кипящего слоя [7-9]. Исходная смесь компонентов (П) и воздух (В) подаются в размольную камеру 1 в таком соотношении, которое обеспечивает формирование в размольной камере кипящего слоя. За счет столкновения частиц между собой и со стенками аппарата происходит их измельчение.

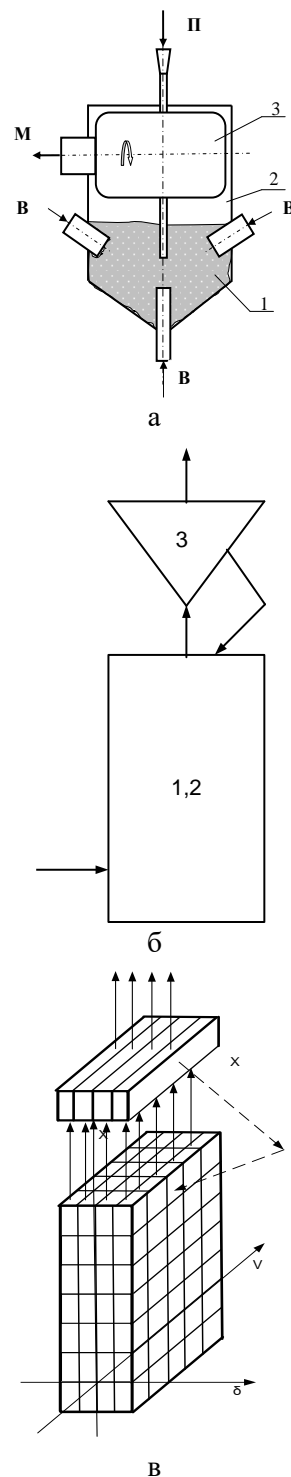


Рис. 3. Эскиз (а), расчетная схема потоков (б) и вид расчетного пространства (в) в струйной мельнице циркулирующего кипящего слоя: 1 – размольная камера; 2 – гравитационная ступень классификации; 3 – центробежная ступень классификации; В – подача воздуха, П – подача исходного порошка, М – выход мелкого продукта разделения

Fig. 3. Sketch (a), flow diagram (b) and form of sample space (c) in the fluidized bed jet mill: 1 - grinding chamber; 2 - gravitational classification stage; 3 - centrifugal classification stage; B is the air supply, P is the feed of components mixture, M is the output of the fine

Измельченные частицы разной крупности выносятся потоком воздуха из кипящего слоя в гравитационную ступень классификатора 2, которая расположена над кипящим слоем. После гравитационной классификации крупные зерна возвращаются в слой, а мелкие частицы выносятся воздухом в следующую, центробежную ступень классификатора 3. Мелкие частицы после центробежной ступени покидают аппарат, а крупные зерна возвращаются на повторное измельчение в размольную камеру.

Для описания кинетики селективного измельчения и оценки эффективности обогащения целевого продукта разработана математическая модель, построенная на основе кинетического уравнения Больцмана [10-12], которое в последнее время широко используется для описания различных процессов в химической инженерии [13-16]. Математическая модель измельчения смеси в мельнице кипящего слоя подробно представлена в работе [5], однако эмпирического обеспечения для практического использования этой модели разработано не было.

При построении модели в результате декомпозиции системы струйной мельницы выделены три подсистемы: размольная камера и две ступени классификации. Структура связей между подсистемами представлена на рис. 3, б. При описании процессов для каждой подсистемы выбираются определяющие координаты. В размольной камере и гравитационной ступени классификации одновременно протекают процессы измельчения, пневмотранспорта и классификации частиц по крупности. В качестве определяющих координат для описания процессов в размольной камере и гравитационной ступени классификации выбраны размер частиц  $\delta$ , скорость движения частиц  $v$  и координата  $x$ , определяющая положение частиц в слое. Оси координат с указанием их направления и вид трехмерного расчетного пространства представлены на рис. 3, в. Описание процесса классификации в центробежной ступени выполняется с использованием традиционной модели классификатора в виде кривой парциальных выносов [6].

Для решения уравнений модели используется матричный метод [17], в котором непрерывная плотность распределения вещества заменяется дискретным ее представлением по выделенным ячейкам расчетного пространства. Многомерное расчетное пространство (рис. 3, в) для этого преобразуется в одномерную цепь ячеек, искомая

плотность распределения вещества по ячейкам представляется одномерным вектором  $\mathbf{f} = \{f_i\}$ , где индекс  $i$  показывает номер элемента. Указывая для каждой ячейки адреса ячеек, в которые возможен переход, и вероятности этих переходов  $p_{ij}$ , эволюция состояния системы во времени описывается выражением

$$f_i^{k_1+1} = \sum_j p_{ij} f_j^{k_1}, \quad (1)$$

где  $k_1$  – номер шага по времени.

Согласно разработанному методу моделирования процессов в рамках дискретных аналогов уравнения Больцмана [15] для получения замкнутого описания необходимо определить вероятности перехода вещества между ячейками выбранного расчетного пространства. Порядок определения этих вероятностей для размольной камеры, гравитационной ступени и центробежной ступени классификации подробно рассматривается в [5]. При построении модели селективного измельчения смеси разнопрочных компонентов искомая плотность определяется отдельно для каждого компонента [5]. Для оценки энергии разрушения  $\tilde{e}_{ij}$  при ударе частиц с размерами  $\delta_i$  и  $\delta_j$ , считается, что энергия разрушения при ударе пропорциональна диссипации энергии [13]. Для определения суммарной энергии, которая подводится к  $i$ -ой фракции при ее взаимодействии с другими частицами, необходимо просуммировать данную энергию по тем классам крупности (ячейкам), которые взаимодействуют с наблюдаемой частицей. При известном подводе энергии к материалу вид функции разрушения [1] находится с использованием принципа максимума информационной энтропии [18-20] в виде:

$$p_{ij} = e^{\mu_j e_{ij}} / \sum e^{\mu_j e_{ij}}, \quad (2)$$

где  $\mu_j$  – коэффициент, значение которого находится из баланса энергий [5],  $e_{ij}$  – удельная энергия, необходимая для разрушения частиц класса  $j$  до размера частиц класса  $i$ , определяемая в соответствии с энергетическим законом измельчения Риттингера [1]:

$$e_{ij} = C_R (1/\delta_i - 1/\delta_j), \quad (3)$$

здесь  $C_R$  – коэффициент в энергетическом законе Риттингера, значение которого обуславливается прочностными свойствами компонента и определяется в ходе предварительных лабораторных испытаний согласно предложенной методике.

В качестве интегральной оценки эффективности обогащения был использован показатель степени очистки, значение которого при полном выделении ключевого компонента равно единице, а при отсутствии разделения равно нулю [5]:

$$\varepsilon = M_1 / M_{10} - M_2 / M_{20}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – степень очистки смеси,  $M_1, M_2$  – массопотоки компонентов с разной прочностью на выходе из установки;  $M_{10}, M_{20}$  – аналогичные величины на входе в установку. Значения  $M_1, M_2$  определялись в ходе расчетных исследований по предложенной модели как с учетом, так и без учета обмена энергией между компонентами смеси. Для описания классификации продуктов разрушения смеси в центробежной ступени использована модель идеального разделения с одинаковым для каждого компонента смеси граничным размером разделения [6].

Представленные подходы для определения вероятностей переходов при измельчении (2) для смеси двух разнопрочных компонентов совместно с вероятностями переходов частиц при движении в размольной камере [5] представляют замкнутое математическое описание селективного измельчения смеси.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований расчетное пространство для каждого компонента представлено трехмерным массивом ячеек, дискретные значения фазовых координат которого задаются векторами:  $x = [0,1 \ 0,2 \ 0,3 \ 0,4 \ 0,5 \ 0,6 \ 0,7 \ 0,8]$ , м;  $v = [-2,8 \ -2,1 \ -1,4 \ -0,7 \ 0,01 \ 0,7 \ 1,4 \ 2,1 \ 2,8 \ 3,5]$ , м/с;  $\delta = [56 \ 71 \ 100 \ 125 \ 160 \ 300 \ 400 \ 600 \ 750 \ 1020 \ 1600]$ , мкм. Результаты расчетного анализа в виде зависимости максимальной степени очистки компонентов от соотношения прочностных свойств компонентов представлены на рис. 4. Кривая 1 на рисунке является результатом моделирования совместного измельчения, при котором учитывается передача энергии между частицами разных компонентов, кривая 2 – совместного измельчения без учета обмена энергии между частицами разных компонентов. При учете энергообмена между частицами разных компонентов показатель степени очистки смеси достигает более высоких значений, что связано с более интенсивным подводом энергии и избирательностью этого подвода энергии по сравнению с отдельным моделированием измельчения компонентов.

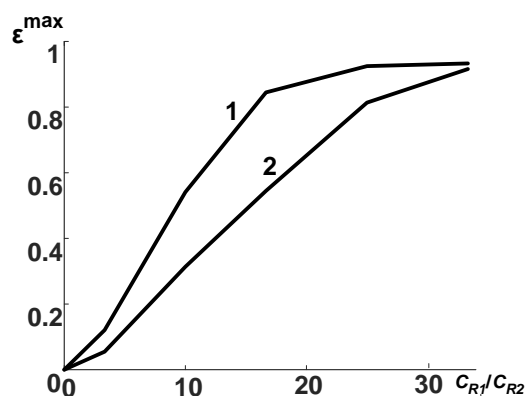


Рис. 4. Зависимость максимальных значений степени очистки процесса с учетом взаимного влияния компонентов друг на друга (1) и без его учета (2) от относительной прочности компонентов смеси

Fig. 4. The dependence of the maximum values of the degree of purification of the process, taking into account the mutual influence of the components on each other (1) and without taking it into account (2) on the relative strength of the mixture components

Результаты расчетного исследования зависимости максимальной степени очистки от относительной прочности компонентов, которая оценивается отношением коэффициентов в энергетическом законе Риттингера  $C_R$ , показывают (рис. 4), что при одинаковой прочности компонентов ( $C_{R1}/C_{R2} = 1$ ) обогащения практически не происходит. При большом различии в прочностных свойствах компонентов ( $C_{R1}/C_{R2} > 30$ ) степень очистки приближается к единице как в рамках линейной (кривая 2), так и рамках нелинейной (кривая 1) моделей. При этом результаты моделирования в рамках линейной и нелинейной моделей дают практически одинаковые значения для одинаковых и сильно отличающихся значений относительной прочности. При промежуточных значениях относительной прочности компонентов ( $1 < C_{R1}/C_{R2} < 30$ ) линейная модель приводит к существенным погрешностям, которые для величины степени очистки доходят до 35%.

Проведенные ранее экспериментальные исследования позволили определить отношение коэффициентов в энергетическом законе Риттингера для кварцевого  $C_{R1}$  и сахарного  $C_{R2}$  песка, которое составило  $C_{R1}/C_{R2} = 3,33$ . Согласно зависимости, приведенной на рис. 4, при таком соотношении коэффициентов степень очистки компонентов не превышает 10%. На основании приведенных данных следует признать, что использование струйных мельниц циркулирующего кипящего слоя для разделения рассматриваемых компонентов является не пригодным.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать методику гранулометрии смеси разнопрочных компонентов и на ее базе развить концепцию моделирования химических процессов на основе дискретных аналогов уравнения Больцмана для описания селективного измельчения смеси разнопрочных компонентов. Проведенный расчетный анализ показал, что модель струйной мельницы циркулирующего кипящего слоя вместе с предложенной методикой определения прочностных характеристик компонентов позволяет проводить инженерные расчеты для

определения возможности и эффективности селективного измельчения смеси разнопрочных компонентов, что, в свою очередь, позволяет проводить оценку возможности обогащения компонентов и определять оптимальные условия технологического процесса разделения данных компонентов. Дальнейшее развитие разработанного подхода планируется проводить в направлении моделирования и расчета селективного измельчения смесей, состоящих из трех и более компонентов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00028А).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New Approaches. Ivanovo: ISPU Press. 1997. 108 p.
2. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических теплообменных установок. Иваново: ИГЭУ. 2009. 176 с.
3. **Ревнивцев В.И.** Селективное разрушение минералов. М.: Недра. 1988. 286 с.
4. **Осипов Д.А., Жуков В.П.** Нелинейная модель смеси разнопрочных компонентов в струйной мельнице кипящего слоя. *Вестн. ИГЭУ.* 2017. Вып. 2. С. 51-55.
5. **Жуков В.П., Осипов Д.А., Otwinowski H., Urbaniak D.** Расчетно-экспериментальные исследования измельчения смеси разнопрочных компонентов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 6. С. 109-115.
6. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В.** Аэродинамическая классификация порошков. Иваново: ПресСто, ИГЭУ. 2014. 160 с.
7. **Fukunaka T., Golman B., Shinohara K.** Batch grinding kinetics of Ethenzamide particles by fluidized-bed jet-milling. *Internat. J. Pharm.* 2006. 311. P. 89-96.
8. **Zhukov V., Ogurcov A., Otwinovski H., Zbronski D.** Conception of a matrix model of particle attrition in fluidized bed. Powder: handling and processing. 2003. V. 15. N 6. P. 386-389.
9. **Wang, Y., Peng, F.** Parameter effects on dry ne pulverization of alumina particles in a uidized bed opposed jet mill. *Powder Technol.* 2011. 214. N 2. P. 269-277.
10. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Моделирование и расчет совмещенных процессов на основе уравнения Больцмана. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2010. Т. 53. Вып. 11. С. 120-123.
11. **Веденяпин В.В.** Кинетическое уравнение Больцмана и Власова. М.: Физматлит. 2001. 112 с.
12. **Aristov V.V., Rovenskaya O.I.** Application of the Boltzmann kinetic equation to the eddy problems. *Computers and Fluids.* 2011. 50. P. 189-198.
13. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных моделей уравнения Больцмана. *Теор. основы хим. технологии.* 2017. Т. 51. № 1. С. 78-84.
14. **Беляков А.Н.** Применение дискретных моделей уравнения Больцмана к описанию совмещенных процессов в технологии измельчения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 3. С. 73-76.

## REFERENCES

1. **Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New Approaches. Ivanovo: ISPU Press. 1997. 108 p.
2. **Zhukov V.P., Barochkin Ye.V.** System analysis of energy heat and mass transfer installations. Ivanovo: IGEU. 2009.176 p. (in Russian).
3. **Revnitvsev V.I.** Selective destruction of minerals. M.: Nedra. 1988. 286 p. (in Russian).
4. **Osipov D.A., Zhukov V.P.** Nonlinear model of a mixture of different strength components in a fluidized bed jet mill. *Vestn. ISGPU.* 2017. N 2. P. 51-55 (in Russian).
5. **Zhukov V.P., Osipov D.A., Otwinowski H., Urbaniak D.** Calculated and experimental studies of grinding a mixture of different strength components. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 6. P. 109-115 (in Russian).
6. **Mizonov V.Ye., Ushakov S.G., Barochkin E.V.** Aerodynamic classification of powders. Ivanovo: PresSto, IGEU. 2014. 160 p. (in Russian).
7. **Fukunaka T., Golman B., Shinohara K.** Batch grinding kinetics of Ethenzamide particles by fluidized-bed jet-milling. *Internat. J. Pharm.* 2006. 311. P. 89-96.
8. **Zhukov V., Ogurcov A., Otwinovski H., Zbronski D.** Conception of a matrix model of particle attrition in fluidized bed. Powder: handling and processing. 2003. V. 15. N 6. P. 386-389.
9. **Wang, Y., Peng, F.** Parameter effects on dry ne pulverization of alumina particles in a uidized bed opposed jet mill. *Powder Technol.* 2011. 214. N 2. P. 269-277.
10. **Zhukov V.P., Belyakov A.N.** Simulation and calculation of combined processes on the basis of the Boltzmann equation. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2010. V. 53. N 11. P. 120-123 (in Russian).
11. **Vedenyapin V.V.** The kinetic equation of Boltzmann and Vlasov. M.: Fizmatlit. 2001. 112 p. (in Russian).
12. **Aristov V.V., Rovenskaya O.I.** Application of the Boltzmann kinetic equation to the eddy problems. *Computers and Fluids.* 2011. 50. P. 189-198.
13. **Zhukov V.P., Belyakov A.N.** Simulation of combined heterogeneous processes based on discrete models of the Boltzmann equation. *Teor. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2017. V. 51. N 1. P. 78-84 (in Russian).



15. **Zhukov V.P., Otwinowski H., Belyakov A.N., Wylecial T., Mizonov V.E.** Boltzmann Equation in the Modeling of Mineral. *Processing Archives of Mining Sciences*. 2015. T. 60 (2). P. 507-516.
16. **Zhukov V., Belyakov A., Barochkin E.** Description of grinding kinetics on the basis of entropic generalization of Maxwell-Boltzmann distribution. Proc. of The 8th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. May 2015. Tel-Aviv, Israel. CD-edition. Paper#11. 8p.
17. **Жуков В.П., Осипов Д.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Определение условий эффективного разделения разнопрочных компонентов смеси» № 2018611299 от 01.02.2018г.
18. **Rahimi M., Riazi A.** On local entropy of fuzzy partitions. *Fuzzy Sets Syst.* 2014. 234. P. 97-108.
19. **Rahimi M., Assari A., Ramezani F.** A Local Approach to Yager Entropy of Dynamical Systems. *Int. J. Fuzzy Syst.* 2015. 18. P. 98-102.
20. **Жуков В.П., Осипов Д.А., Мизонов В.Е.** Энтропийное моделирование измельчения смеси разнопрочных компонентов твердого топлива. *Вестн. ИГЭУ*. 2017. № 6. С. 40-46. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.6.040-046.
14. **Belyakov A.N.** Application of discrete models of the Boltzmann equation to the description of the combined processes in the grinding technology. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2015. V. 58. N 3. P. 73-76 (in Russian).
15. **Zhukov V.P., Otwinowski H., Belyakov A.N., Wylecial T., Mizonov V.E.** Boltzmann Equation in the Modeling of Mineral. *Processing Archives of Mining Sciences*. 2015. V. 60 (2). P. 507-516.
16. **Zhukov V., Belyakov A., Barochkin E.** Description of grinding kinetics on the basis of entropic generalization of Maxwell-Boltzmann distribution. Proc. of The 8th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. May 2015. Tel-Aviv, Israel. CD-edition. Paper#11. 8p.
17. **Zhukov V.P., Osipov D.A.** Certificate of state registration of the computer program "Definition of conditions for the effective separation of mixed components of different strength" № 2018611299 from 01.02.2018 (in Russian).
18. **Rahimi M., Riazi A.** On local entropy of fuzzy partitions. *Fuzzy Sets Syst.* 2014. 234. P. 97-108.
19. **Rahimi M., Assari A., Ramezani F.** A Local Approach to Yager Entropy of Dynamical Systems. *Int. J. Fuzzy Syst.* 2015. 18. P. 98-102.
20. **Zhukov V.P., Osipov D.A., Mizonov V.E.** Entropy modeling of grinding a mixture of different-strength components of solid fuel. *Vestn. IGEU*. 2017. N 6. P. 40-46 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2017.6.040-046.

*Поступила в редакцию 08.05.2018  
Принята к опубликованию 26.09.2018*

*Received 08.05.2018  
Accepted 26.09.2018*