

УДК 621.926;621.928

СОВМЕСТНАЯ ПЕРЕРАБОТКА СМЕСИ РАЗНОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ЗАМКНУТОМ ЦИКЛЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Д.А. Осипов, В.П. Жуков, В.Е. Мизонов

Ивановский государственный энергетический университет

Показано, что совместное измельчение и классификация разнородных материалов в замкнутом цикле измельчения позволяют выделить из смеси целевой продукт требуемого качества. Моделирование и расчетный анализ процессов измельчения и классификации в замкнутом цикле измельчения выполнены на основе дискретных моделей уравнения Больцмана. В ходе расчетных исследований предложена и протестирована модель классификации компонентов смеси, отличающихся по плотности и по крупности зерен. Представлен алгоритм включения модели классификации в общую модель замкнутого цикла измельчения. На основе созданной модели получено решение практической задачи по извлечению из формовочной смеси кварцевого песка, предназначенного для повторного использования в литейном производстве. Намечены пути и показан порядок выбора параметров процессов измельчения и классификации для эффективного разделения компонентов смеси.

Ключевые слова: формовочная смесь, измельчение, разнородные компоненты, дисперсный материал, кривая разделения, замкнутый цикл измельчения.

ВВЕДЕНИЕ

Для производства отливок разнообразных деталей и их элементов используются литейные формы, для изготовления которых применяются специальные смеси, представляющие собой сочетание высокоогнеупорных веществ с песчано-глинистыми составляющими (ПГС) [1-4]. В последние десятилетия, в связи с постоянным ростом стоимости свежих песков и ростом тарифов на вывоз отработанных материалов, все острее встает вопрос повторного использования отработанных формовочных смесей, для чего требуется их регенерация [3-5]. Разработка моделей и методов расчета, позволяющих проводить обоснованный выбор эффективных технологий регенерации формовочных смесей, является актуальной задачей современных технологий.

В настоящее время для регенерации смесей широко используются системы механической регенерации, в которых для удаления с гранул песка посторонних включений предусматриваются следующие операции: оттирка зерен смеси, пылеудаление, просеивание и охлаждение зерен смеси [3]. Более перспективными в настоящее время считаются динамические системы регенерации, в которых для

удаления из смеси посторонних включений используются мельница и сепаратор [3]. Современные системы регенерации для смесей с песчано-глинистыми составляющими могут включать несколько стадий обеспыливания. Благодаря такой многоступенчатой структуре система обладает определенной гибкостью. Например, часть песка после первичного обеспыливания может быть использована для формовки по ПГС, а песок прошедший полную обработку, может быть использован в качестве свежего песка для изготовления стержней [3].

На основе анализа существующих систем регенерации предлагается более компактная установка со струйной мельницей кипящего слоя [6-8], в которой многостадийная очистка целевого компонента реализуется в одном аппарате за счет многократной циркуляции смеси. Для эффективной регенерации формовочной смеси в таких установках необходимо, во-первых, оценить ее пригодность и, во-вторых, выбрать для нее эффективный рабочий режим. Разработка моделей и методов расчета, позволяющих учитывать перечисленные факторы при анализе технологии регенерации, является актуальной задачей научных исследований.

Целью данного исследования является повышение эффективности разделения компонентов формовочной смеси в установках со струйной мельницей кипящего слоя путем ее моделирования и расчетного анализа.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- разработка математического описания процесса классификации формовочной смеси разнородных компонентов, частицы которых могут отличаться как по крупности, так и плотности;
- инкорпорирование разработанной модели классификации в общую модель замкнутого цикла измельчения со струйной мельницей кипящего слоя;

– определение технологических условий, обеспечивающих эффективность процесса выделения целевого продукта из формовочной смеси.

Объектом исследования являются процессы совместного измельчения и классификации смеси разнородных компонентов, предметом исследования – математические модели классификации и измельчения разнородных компонентов в установке со струйной мельницей кипящего слоя, работающей в замкнутом цикле измельчения.

На рис. 1 представлена исследуемая установка со струйной мельницей кипящего слоя [6], в которой одновременно реализуются процессы измельчения и классификации компонентов.

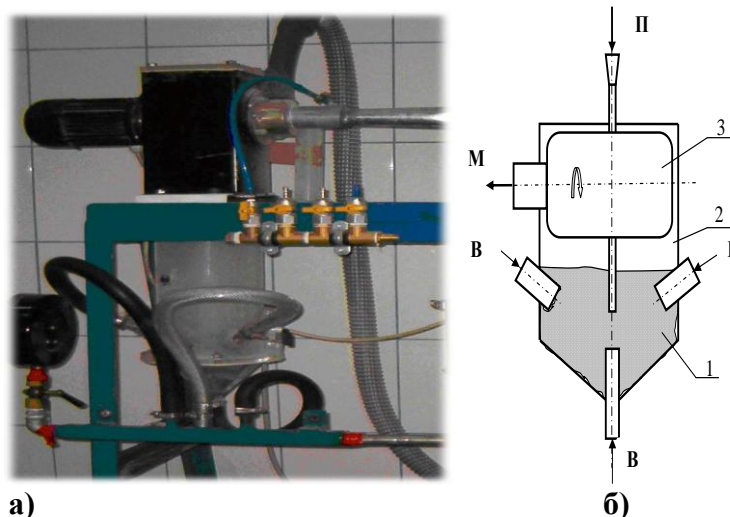


Рис.1. Фотография (а), схема потоков (б) установки со струйной мельницей кипящего слоя: 1–размольная камера; 2–гравитационная ступень классификации; 3–центробежная ступень классификации; В–подача воздуха, П–подача исходного порошка, М–выход мелкого продукта разделения

Исходный материал и воздух подаются в размольную камеру 1. Режимы подачи воздуха и материала обеспечивают пребывание частиц в размольной камере в псевдооживленном состоянии. Измельчение материала происходит преимущественно за счет истирания частиц при их столкновении между собой и со стенками аппарата. Измельченные части-

цы выносятся потоком воздуха в гравитационную ступень классификатора 2, где реализуется их предварительная сортировка по размеру и плотности. Крупные зерна после классификации возвращаются в размольную камеру, а мелкие частицы выносятся воздухом в центробежную ступень классификатора 3. Мелкие частицы после центробежной ступе-

ни покидают аппарат, а крупные зерна в зависимости от целей организации процесса могут возвращаться на повторное измельчение в размольную камеру 1 или выводиться из системы.

Идея избирательного измельчения смеси разнородных компонентов [9-10] заключается в определении таких условий, при которых реализуется преимущественное измельчение менее прочного компонента. Такое измельчение приводит к переходу этого компонента преимущественно в мелкие фракции. Последующая классификация по крупности продуктов измельчения позволяет обогащать мелкий продукт разделением менее прочным компонентом. Одним из эффективных подходов определения технологических условий, при которых возможно получение максимального количества целевого продукта при заданном его качестве, является моделирование, расчет и оптимизация указанных процессов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Теоретическое описание измельчения смеси разнородных компонентов, построенное с использованием дискретных моделей уравнения Больцмана, разработанных нами ранее [11–12]. Основные положения и расчетные соотношения данного подхода, необходимые для дальнейшего построения модели замкнутого цикла измельчения, приводятся ниже.

На основе анализа конструкции мельницы, представленной на рис.1, предложена схема установки для регенерации формовочной смеси (рис.2а) и структура расчетного пространства для ее моделирования (рис.2б). Ячейки расчетного пространства, которые относятся к размольной камере, центробежному и выносному классификаторам, обособлены на этом рисунке, с указанием стрелками связей между этими ячейками.

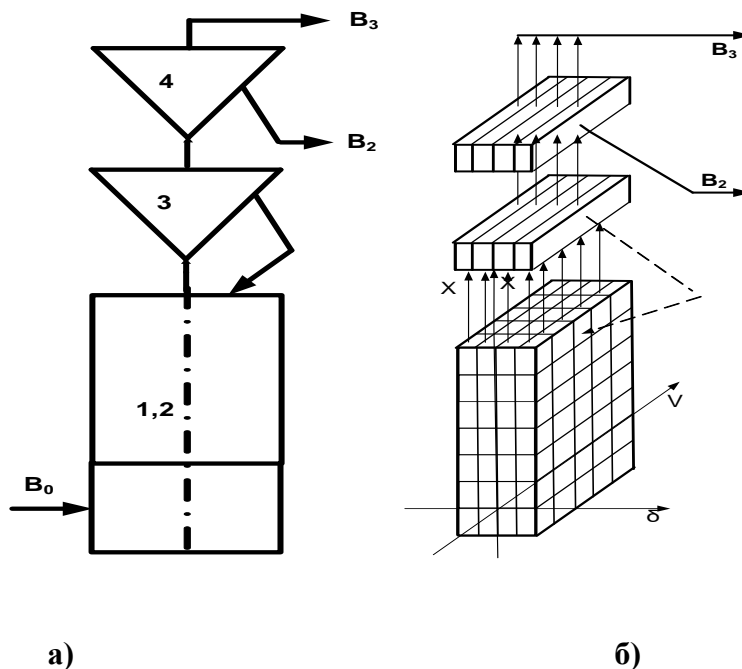


Рис. 2. Расчетная схема потоков (а) и расчетное пространство модели (б) установки для регенерации формовочной смеси со струйной мельнице кипящего слоя:

1–размольная камера; 2–гравитационная ступень классификации; 3–центробежная ступень классификации; 4–выносной классификатор; B_0 –подача исходного порошка, B_2 –выход крупного продукта, B_3 –выход мелкого продукта

В качестве определяющих координат в расчетном пространстве выбраны размер частиц δ , скорость движения частиц v и высота положения частиц в слое x . При построении модели измельчения для смеси разнородных компонентов искомая плотность распределения вещества по ячейкам расчетного пространства \mathbf{f} определяется отдельно для каждого компонента. Между компонентами смеси в рамках модельного описания разрешается обмен энергией, но запрещается обмен веществом [10]. При проведении вычислений многомерное расчетное пространство преобразуется в одномерную цепь ячеек [12], искомая плотность распределения вещества по ячейкам представляется одномерным вектором $\mathbf{f} = \{f_i\}$, где индекс i показывает номер элемента в одномерной цепи. Указывая для каждой ячейки адреса ячеек, в которые возможен переход, и вероятности этих переходов p_{ij} , эволюция состояния системы во времени описывается выражением [12]

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

где k – номер шага по времени.

Для проведения вычислительных экспериментов согласно (1) необходимо определить вероятности перехода вещества между ячейками выбранного расчетного пространства при измельчении и классификации. Методика определения вероятностей переходов между ячейками p_{ij} при измельчении компонентов смеси подробно представлена в работах [11-12].

Для описания процесса классификации в рамках единой методологии (1) требуется найти аналогичные вероятности переходов и адреса этих переходов, с учетом размера и плотности частиц каждого компонента. Для определения указанных вероятностей воспользуемся традиционной моделью классификации в виде кривой разделения классификатора, которую в англоязычной литературе называют также кривой Тромпа [13]. Указанная кривая разделения представляется

в виде зависимости вероятности попадания частиц в тонкий продукт от их размера $\varphi(\delta)$. Для исследуемых условий реализации процесса классификации предлагается использовать соотношение, которое хорошо себя зарекомендовало при описании подобных процессов [14]:

$$\varphi(\delta) = 1 / \left(1 + (\delta / \delta_0)^{k_s} \right), \quad (2)$$

где δ_0 – граничный размер разделения [13], k_s – параметр эффективности разделения. Для учета влияния плотности компонентов смеси на процесс классификации предполагается, что для каждого компонента выбираются свои параметры кривой разделения (2). При этом эффективность разделения k_s , которая зависит в основном от режима работы и конструкции аппарата, принимается одинаковой для обоих компонентов. Соотношение граничных размеров разделения компонентов, которое зависит от плотности материалов, определяется согласно выражению [13]:

$$\delta_{02} / \delta_{01} = (\rho_1 / \rho_2)^{\frac{1}{n+1}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность компонента, δ_0 – граничный размер разделения компонента, индексы 1 и 2 показывают номер компонента; n – параметр, значение которого зависит от вида закона сопротивления: $n=0$ – закон Стокса; 0,5 – закон Аллена; 1 – закон Ньютона [13].

Вероятности перехода частиц в мелкий продукт классификации $\varphi(\delta)$ согласно (2), (3) позволяют определить для частиц каждого компонента, вероятности переходов между ячейками расчетного пространства p_{ij} в уравнении (1), при описании процесса классификации.

Для создания модели замкнутого цикла измельчения в рамках подхода (1), на основании вида расчетного пространства (рис.2б) определяются адреса пере-

ходов для мелкого и крупного продуктов разделения классификатора. Таким образом, предложенный подход (1), дополненный значениями вероятностей переходов между ячейками (2) и структурой потоков в цикле согласно рис.2, описывает для смеси компонентов процессы измельчения и классификации в замкнутом цикле измельчения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для апробации и верификации предложенного математического описания процессов измельчения и классификации в замкнутом цикле проведены расчетные исследования регенерации формовочной смеси. Целью вычислительных экспериментов была оценка возможности проведения регенерации формовочной смеси в струйной мельнице кипящего слоя и определение режимных параметров, обеспечивающих эффективное разделение этой смеси.

В качестве исходного материала для проведения вычислительного эксперимента выбирается смесь, состоящая из двух компонентов. В качестве первого компонента рассматривается кварцевый песок, который нужно очистить при регенерации. В качестве второго компонента рассматривается совокупность посторонних включений, которые нужно удалить при регенерации формовочной смеси. Второй компонент, смеси в общем случае может включать [3] глину, синтетические смолы, каменный уголь и другие составляющие, набор которых определяется конкретными технологиями формования деталей. Отношение плотности первого компонента к плотности второго компонента смеси, в тестовом примере составило 1,625. В зависимости от конкретного набора посторонних включений в формовочной смеси, результаты вычислительного эксперимента могут отличаться от результатов, приведенных ниже. Для характеристики прочностных свойств компонентов использовался коэффициент в энергетическом законе Рит-

тенгера [11], значение которого характеризует удельную энергию, необходимую для сокращения размера зерен в два раза. Относительная прочность компонентов по результатам предварительных исследований [15] принималась в тестовом примере равной: $C_{R1}/C_{R2} = 3,33$; где C_R – коэффициент в законе Риттенгера. При проведении вычислительных экспериментов принципиальное значение имеют не абсолютные, а относительные значения показателя измельчаемости материалов. Это связано с тем, что для определения абсолютного значения этих показателей необходимо знать долю подведенной энергии, которая идет на собственно измельчение. Другими словами, нужно знать коэффициент полезного действия установки, значение которого для разных измельчителей существенно различаются [16-17].

Размер расчетного пространства при проведении исследований для каждого компонента составлял $n_1 \times m_1 \times k_1$ ячеек, где $n_1 = 12$ – число ячеек вдоль координаты δ , $m_1 = 10$ – число ячеек вдоль координаты v , $k_1 = 8$ – число ячеек вдоль координаты x . Расчеты выполнялись для установки, работающей в периодическом режиме: в начальный момент времени в размольную камеру загружалась порция смеси с известным составом компонентов. Расчет выполнялся согласно (1)-(3) в течение заданного периода времени. При проведении расчетов, материал после второй ступени разделения в выносном классификаторе, выводился из установки в целевой, крупный продукт разделения B_2 . В этом продукте определялось содержание обоих компонентов. Для оценки качества разделения компонентов использовался показатель эффективности выделения целевого компонента и концентрация целевого компонента в готовом продукте. Эффективность выделения компонентов ε рассчитывалась через массовую долю песка в регенерированной смеси от исходного его количества в загрузке. Значение показателя эффектив-

ности по ключевому компоненту находилось согласно:

$$\varepsilon = G_1 / G_{01}, \quad (4)$$

где ε – эффективность выделения ключевого компонента в готовый продукт, G_1 – масса ключевого компонента (кварцевого песка) в готовом продукте; G_{10} – аналогичная величина в исходном продукте.

В расчетных исследованиях по регенерации формовочной смеси, загрузка размольной камеры мельницы, работающей в периодическом режиме, составляла для первого компонента $G_{01} = 0,95$ кг, а для второго компонента – $G_{02} = 0,05$ кг. В результате расчетов определялись масса загрузки размольной камеры, выход

крупного продуктов разделения для каждого компонента, а по этим данным – эффективность выделения ε и концентрация целевого компонента в готовом продукте. Для проведения вариантных расчетных исследований разработан алгоритм и программа для его реализации в среде Матлаб [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетного анализа регенерации формовочной смеси в замкнутом цикле измельчения представлены на рис.3, на котором приведены зависимости массовой концентрации целевого компонента в готовом продукте (кривая 2) и эффективность его выделения (кривая 1) от времени процесса.

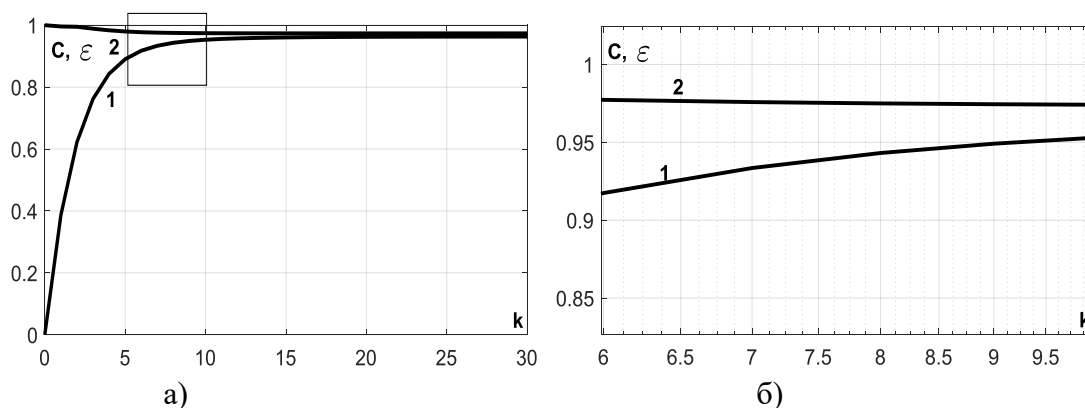


Рис. 3. Эффективность выделения (1) и зависимость концентрации (2) целевого компонента в готовом продукте от времени периодического процесса (а) и увеличенный фрагмент этой зависимости (б)

Для оценки чистоты получаемого продукта и сравнения ее с допустимым значением использовалась концентрация целевого компонента смеси, которая определялась как массовая доля компонента в грубом продукте выносного классификатора. Согласно технологическим требованиям содержание кварцевого песка в смеси должно составлять не менее 98% [4]. Найденные в ходе расчетных исследований режимные параметры показы-

вают, что массовая доля песка, выделенного при этом, составила $\varepsilon = 92,3\%$. Данные результаты позволяют оценивать экономическую эффективность предлагаемой системы регенерации и выбрать параметры, необходимые для эффективной организации процесса.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель классификации смеси разнородных компонентов, отличающихся как по крупности частиц, так и по их плотности.

2. Разработан алгоритм инкорпорирования модели классификации смеси разнородных компонентов в общую модель замкнутого цикла измельчения со струйной мельницей кипящего слоя.

3. Исследовано влияние продолжительности измельчения и классификации на степень разделения и концентрацию кварцевого песка в готовом продукте, показана возможность проведения регенерации формовочной смеси в замкнутом цикле измельчения со струйной мельницей кипящего слоя.

4. Намечены пути и показан порядок выбора параметров процессов измельчения и классификации для эффективного разделения компонентов смеси.

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

The reported study was funded by RFBR (project № 18-08-00028А)

ЛИТЕРАТУРА

1. Голотенков О. Н. Формовочные материалы. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 164 с.
2. Гуляев Б. Б., Корнюшкин О. А., Кузин А. В. Формовочные процессы. Л.: Машиностроение, 1987. 264 с.
3. Формовочные материалы и технология литейной формы: Справочник // Под общ. ред. С. С. Жуковского. М.: Машиностроение, 1993. 432 с.
4. ГОСТ 2138–91. Пески формовочные. Общие технические условия.
5. Бойченко А. С., Горфинкель В. М., Пышминцев Ю. П. Сухая механическая регенерация на заводах Минтяжмаша // Литейное производство. 1987. №5. С.12.
6. Otwinowski H., Zhukov V., Wyleciał T., Belyakov A., Górecka-Zbrońska A. Research and mod-

eling of processes in the fluidized bed opposed jet mill // Technical Sciences. 2014. Vol. 17. N. 4. P. 381–390.

7. Fukunaka T., Golman B., Shinohara K. Batch grinding kinetics of Ethenzamide particles by fluidized-bed jet-milling // International Journal of Pharmaceutics. 2006. 311. P. 89–96.

8. Palaniandy S., Azizli K., Hussin H., Hashim S. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill // Minerals Engineering. 2008. 21. P. 380–388.

9. Ревнивцев В.И. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.

10. 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.

11. 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.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Определение условий эффективного разделения разнопрочных компонентов смеси». Заявка № 2017662987 от 13.12.2017, регистрация 2018611299 от 01.02.2018. Авторы: Жуков В.П., Осипов Д. А. Дата публикации и номер бюллетеня: 01.02.2018. Бюл. № 2.

13. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г., Барочкин Е.В. Аэродинамическая классификация порошков. ПресСто, ИГЭУ. 2014. 160 с.

14. Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Жуков В.П. Обоснование выбора зависимости, используемой для аппроксимации кривой разделения Тромпа // Вестник ИГЭУ. 2018. №6. С. 15–23.

15. 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.

16. Жуков В.П., Беляков А.Н. Термодинамический подход к описанию измельчения истиранием частиц произвольной формы. // Вестник ИГЭУ. 2014. №4. С. 49–53.

17. Беляков А.Н., Жуков В.П., Otwinowski H., Тупицын Д.В. Анализ энергетической эффективности процесса измельчения на основе термодинамического подхода // Вестник ИГЭУ. 2014. №2. С. 54–59.

Рукопись поступила в редакцию 25.01.2019

JOINT PROCESSING OF A MIXED MIXTURE COMPONENTS IN CLOSED CRUSHING CYCLE

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

It is shown that the joint grinding and classification of dissimilar materials in a closed milling circuit makes it possible to separate the target product from the mixture with required quality. The modeling and calculation of the grinding and classification processes in a closed milling circuit was carried out on the basis of the discrete models of Boltzmann equation. In the course of computational studies, a model for classification of components of a mixture different in density and grain size has been proposed and tested. An algorithm for the inclusion of the classification model in the general model of a closed-loop grinding process is presented. On the basis of the developed model, the solution of the practical task of extracting quartz sand from the molding mixture for reuse in the foundry has been obtained. The ways and the order of selection of the parameters of the grinding processes and the classification for effective separation of the components of the mixture are indicated.

Key words: molding sand, shredding, dissimilar components, particulate solids, grade efficiency curve, closed milling circuit.

References

1. Golotenkov O. N. Formovochnyyematerialy. Penza: Izd-voPenz. gos. un-ta, 2004. 164 s.
2. Gulyayev B. B., Korniyushkin O. A., Kuzin A. V. Formovochnyyeprotsessy. L.: Mashino-stroyeniye, 1987. 264 s.
3. Formovochnyyematerialyitekhnologiyaliteynoyformy: Spravochnik // Pod obshch. red. S. S. Zhukovskogo. M.: Mashinostroyeniye, 1993. 432 s.
4. GOST 2138–91. Peski formovochnyye. Obshchiyetekhnicheskiiyusloviya.
5. Boychenko A. S., Gorfinkel' V. M., Pyshmintsev YU. P. SukhayamekhanicheskayaregeneratsiyanazavodakhMintyazhmashaLiteynoyeproizvodstvo. 1987. №5. S.12.
6. Otwinowski H., Zhukov V., Wyleciał T., Belyakov A., Górecka-Zbrońska A. Research and modeling of processes in the fluidized bed opposed jet mill. Technical Sciences. 2014. Vol. 17. N 4. P. 381–390.
7. Fukunaka T., Golman B., Shinohara K. Batch grinding kinetics of Ethenzamide particles by fluidized-bed jet-milling. International Journal of Pharmaceutics. 2006. 311. P. 89–96.
8. Palaniandy S., Azizli K., Hussin H., Hashim S. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill // Minerals Engineering. 2008. 21. P. 380–388.
9. Revnitshev V.I. Selektivnoy razrusheniye mineralov. M.: Nedra, 1988. 286 s.
10. Zhukov V.P., Osipov D.A., Otwinowski H., Urbaniak D. Raschetno-eksperimental'nyye issledovaniya izmel'cheniya smesi raznorodnykh komponentov. Izv. vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya. 2017. T. 60. Vyp. 6. S. 109–115.
11. Zhukov V.P., Belyakov A.N. Modelirovaniye sovmeshchennykh geterogennykh protsessov na osnove diskretnykh modeley uravneniya Bol'tsmana. Teor. osnovy khim. tekhnologii. 2017. tom 51. №1. S. 78–84.
12. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM «Opredele niye usloviy effektivnogo razdeleniya raznorodnykh komponentov smesi». Zayavka № 2017662987 ot 13.12.2017, registratsiya 2018611299 ot 01.02.2018. Avtory: Zhukov V.P., Osipov D. A. Data publikatsii inomer byulletenya: 01.02.2018. Byul. № 2.
13. Mizonov V.Ye., Ushakov S.G., Barochkin Ye.V. Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov. PresSto, IGEU. 2014. 160 s.
14. Shuvalov S.I., Novosel'tseva S.S., Zhukov V.P. Obosnovaniye vybor azavisimosti, ispol'zuyemy dlya approksimatsii krivoy razdeleniya Trompa. Vestnik IGEU. 2018. № 6. S. 15-23.
15. Osipov D.A., Zhukov V.P., Mizonov V.Ye., Ogurtsov A.V. Raschetno-eksperimental'nyye issledovaniya izmel'cheniya smesi raznorodnykh komponentov v struynoymel'nitsetsirkuliruyushchegokipyashchegosloya // Izv. vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya. 2019. T. 62. Vyp. 1. S. 98-106.
16. Zhukov V.P., Belyakov A.N. Termodinamicheskii podkhod k opisaniyu izmel'cheniya i stiraniiyemchastits proizvol'noy formy // Vestnik IGEU. 2014. №4. S. 49–53.
17. Belyakov A.N., Zhukov V.P., Otwinowski H., Tupitsyn D.V. Analiz energeticheskoy effektivnosti protsessa izmel'cheniya na osnovе termodinamicheskogo podkhoda // Vestnik IGEU. 2014. №2. S. 54–59.