

УДК 622.795.2

**А.Н. Исаенко**

**Ю.Г. Качан, д-р техн. наук**

## **ОЦЕНКА УСРЕДНИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ БУНКЕРОВ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Наведен результати обчислювальних експерименту з визначення ефективності усереднення гранулометричного складу руди в накопичувальному бункері ящикового (силосного) типу, введеного до технологічної схеми крупного подрібнення.

**Ключові слова:** усереднення, бункер, сегрегація

Приведены результаты вычислительных экспериментов по определению эффективности усреднения гранулометрического состава руды в накопительном бункере ящичного (силосного) типа, включенного в технологическую схему крупного дробления.

**Ключевые слова:** усреднение, бункер, сегрегация.

Несмотря на то, что бункера с донным выпуском руды остаются основным типом накопительных складов на обогатительных фабриках, процессы разделения и перемешивания сыпучего в них материала изучены крайне незначительно. Результаты экспериментального исследования усреднительных свойств таких бункеров показали, что усреднение материала зависит от большого количества факторов, которые можно разделить на три основные группы: технологические, конструктивные и физико-механические свойства руды. Вместе с тем в специальной литературе отсутствуют сведения о количественной оценке совместного влияния указанных групп факторов на эффективность усреднения рудного сырья в бункерах с гравитационной разгрузкой, что затрудняет определение их места и роли в важной задаче стабилизации качественных характеристик потоков руды с целью повышения технико-экономических показателей обогащения.

Наиболее результативный метод оценки усреднительных свойств бункеров – вычислительный эксперимент, основанный на математическом моделировании процессов загрузки и разгрузки. В работах [1-4] исследовались усреднительные свойства накопительных складов напольного, полубункерного типов без учета гранулометрического состава загружаемой руды и конструктивных особенностей узлов их разгрузки. В то же время именно усреднение руды по гранулометрическому составу или расчетным классам +100 мм, – 25 мм имеет важное значение в технологических схемах с самоизмельчением, а бункера ящичного, силосного типов являются основными накопительными емкостями на железорудных обогатительных фабриках. Вследствие этого необходимо

провести дополнительные исследования.

Цель данной статьи – обобщение и анализ результатов вычислительных экспериментов по определению эффективности усреднения гранулометрического состава руды в накопительном бункере ящичного (силосного) типа, включенного в технологическую схему крупного дробления. Исследования выполнены на модели [5] для несовмещенных по времени процессов загрузки и разгрузки. Характеристики бункера: объем – 1680 м<sup>3</sup>; размеры – 10×12 м; номинальный уровень загрузки – 15 м; выпускное отверстие щелевидное, ориентированное перпендикулярно линии движения ПЗУ. Параметры загрузки: производительность – 3000 т/ч; скорость движения частиц руды по откосу – 0,5 м/с; угол естественного откоса – 36°. Производительность разгрузочного узла – 115 т/ч. Характеристики физико-механических свойств руды: показатель сыпучести – 0,22 м; коэффициент сегрегации – 0,422 с<sup>-1</sup>; коэффициент макроdiffузии – 0,011 м<sup>2</sup>/с; насыпная плотность руды – 2,2 т/м<sup>3</sup>. Для оценки качества подготовки руды к процессу самоизмельчения использовался технологический показатель – среднеквадратическое отклонение содержания класса +100 мм в питании мельницы, а для оценки усреднительных свойств бункера – степень усреднения по содержанию класса +100 мм в объемах партий руды, равных объему загруженного штабеля.

В основу моделирования гранулометрического состава загружаемой руды положена теоретико-вероятностная схема, регрессионные зависимости которой получены по данным характеристик крупности разгрузки дробилок крупного дробления [6, табл. II.16]:

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_{0-50} &= 76,74 - 0,15 d_n + \xi_{0-50}; & \Delta\gamma_{0-50} &= 32,39 - 0,04 d_n + \xi_{0-50}; \\ \Delta\gamma_{100-150} &= 16,2 + \xi_{100-150}; & \Delta\gamma_{150-200} &= 11,25 + \xi_{150-200}; \\ \Delta\gamma_{200-250} &= 8 + \xi_{200-250}; & \Delta\gamma_{250-300} &= 7,5 + \xi_{250-300}; \\ \Delta\gamma_{300-350} &= 7 + \xi_{300-350}; & \Delta\gamma_{d_k-d_i} &= 95 + \sum_{i=0}^{K-1} \Delta\gamma_{d_i-d_{i+1}}, \end{aligned}$$

где  $\Delta\gamma_{d_i-d_{i+1}}$  – выход узкого класса, %;  $d_n$  – номинальная крупность продуктов дробления, мм;  $\xi_{d_i-d_{i+1}}$  – независимые нормально распределенные случайные величины ( $M\xi_{d_i-d_{i+1}} = 0, 2D\xi_{d_i-d_{i+1}} = \sigma^2$ );  $d_k$  – нижняя граница последнего узкого класса.

Данная схема позволила исключить систематические ошибки моделирования выхода крупных и мелких классов, возникающие при использовании известных зависимостей Андреева-Шумана и Розина-Раммлера,

## Усреднення та транспортування

а также учесть стохастические составляющие отклонений от средних значений.

Отклонения выхода отдельных узких классов от их средних значений моделировались генерированием нормально распределенных случайных чисел, а межслоевое изменение номинальной крупности задавалось в виде типовой гармонической функции

$$d_n = d_{nm} \sin(2\pi n_s \Delta\tau / T_{d_n}) + d_{но},$$

где  $d_{nm}$  – амплитуда;  $n_s$  – номер загружаемого слоя руды;  $\Delta\tau$  – интервал дискретизации времени загрузки, равный времени одного прохода ПЗУ;  $T_{d_n} = 4i\Delta\tau$ , ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) – период колебаний;  $d_{но}$  – среднее значение номинальной крупности.

Моделирование распределения скоростей движения частиц руды при выпуске дало возможность выделить четыре характерные области в бункере с вертикальными стенками: застойную, сходящегося течения, переходную и поршневого движения. Как установлено, распределение скоростей в бункере и размеры данных областей зависят от соотношения сторон бункера и разгрузочного узла. Эти соотношения могут быть охарактеризованы параметром – степенью раскрытия площади днища бункера:

$$\mu = \mu_x \mu_y,$$

Здесь  $\mu_x = a/A$ ;  $\mu_y = b/B$ ,  $a$ ,  $b$  – размеры сторон щелевидного разгрузочного отверстия;  $A$ ,  $B$  – ширина пролета и длина бункера.

В экспериментах исследовалось влияние данного конструктивного параметра бункера, частоты (периода), а также интенсивности колебаний гранулометрического состава исходной руды на эффективность ее усреднения при номинальном уровне загрузки. Результаты моделирования влияния этих факторов приведены на рис. 1-3.

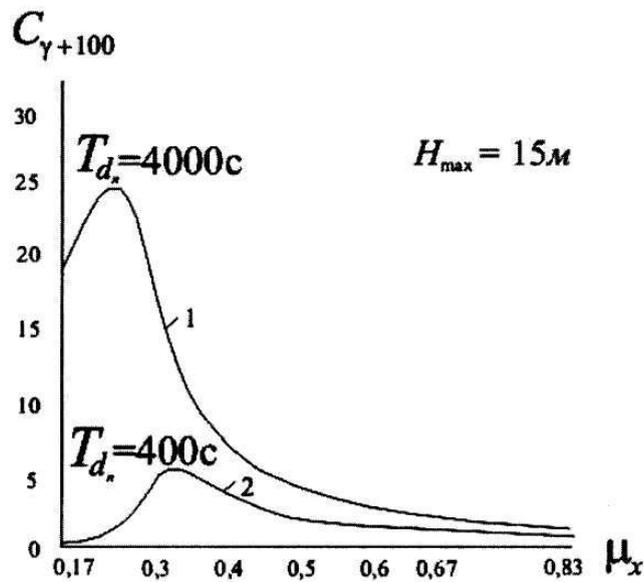


Рис. 1. Зависимости степени усреднения от степени раскрытия площади дна бункера: 1 – без сегрегации; 2 – в условиях сегрегации руды при загрузке

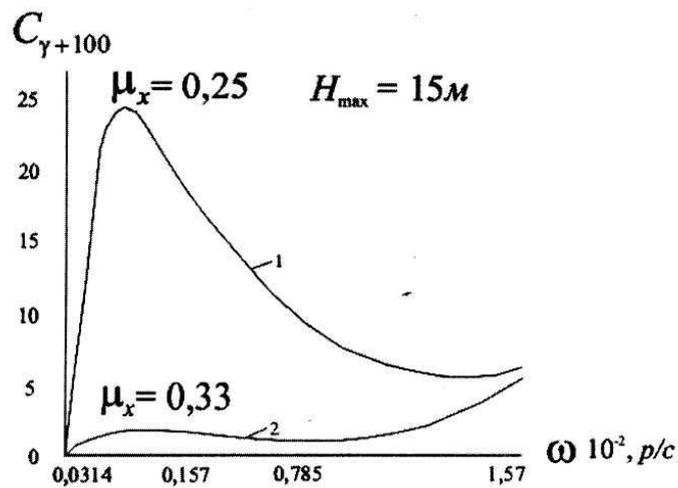


Рис. 2. Зависимости степени усреднения от частоты колебаний номинальной крупности продуктов дробления: 1 – без сегрегации; 2 – в условиях сегрегации руды при загрузке

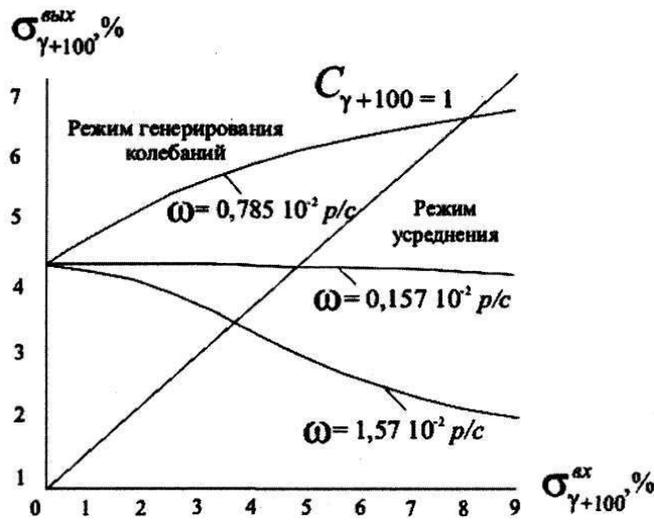


Рис. 3. Зависимости среднеквадратического отклонения содержания класса +100 мм на выходе бункера от среднеквадратического отклонения содержания класса+100 мм в потоке загружаемой руды

Методом планированного эксперимента определены оптимальные значения указанных факторов, при которых степень усреднения по содержанию класса +100 мм в руде  $C_{\gamma+100}$  достигает максимального значения. В условиях отсутствия сегрегации:  $C_{\gamma+100} = 25$ ;  $T_{d_n} = 4000$  с;  $\sigma_{\gamma+100}^{вх} = 8,1\%$ ;  $\mu_x = 0,25$ ;  $\mu_y = 0,15$ . В условиях сегрегации:  $C_{\gamma+100} = 5,6$ ;  $T_{d_n} = 400$  с;  $\sigma_{\gamma+100}^{вх} = 8,1\%$ ;  $\mu_x = 0,33$ ;  $\mu_y = 0,15$ .

Приблизительная оценка степени усреднения от количества загруженных слоев руды  $n_{sm}$

$$\max C_{\gamma+100} \cong (1 + \alpha n_{sm})^\beta,$$

где  $\alpha = 0,6$ ;  $\beta = 1$  в условиях отсутствия сегрегации, а в условиях сегрегации руды при загрузке  $\beta = 0,5$ .

При отсутствии гранулометрической сегрегации в процессе загрузки наибольшая эффективность усреднения руды достигается в случае, когда фигура выпуска охватывает как можно большее число горизонтальных слоев руды с различным содержанием класса +100 мм. Это условие выполняется при минимальных значениях степени раскрытия площади днища и периоде колебаний номинальной крупности, равным

$$T_{d_n}^{opt} = n_{sm} \Delta \tau,$$

где  $n_{sm}$  – количество слоев руды в штабеле.

## Усреднения та транспортування

Процесс гранулометрической сегрегации при загрузке приводит к возникновению значительных неоднородностей в поперечном сечении штабеля. Моделирование данного процесса выявило, что относительное изменение содержания класса +100 мм по длине откоса составляет 107-127% [7]. В этом случае для эффективного усреднения руды в бункере необходимо обеспечить смешивание руды из периферийных и центральных участков штабеля, что достигается за счет увеличения степени раскрытия площади днища. Вследствие особенностей распределения скоростей, одновременно с увеличением области движения руды уменьшается количество горизонтальных слоев, охватываемых фигурой выпуска. Это вызывает значительное (в 3-5 раз) снижение степени усреднения и уменьшение оптимального периода колебаний номинальной крупности до минимально возможного.

$$T_{d_n}^{opt} = 4\Delta\tau.$$

Особенность эксплуатации накопительных бункеров обогатительных фабрик – изменчивость уровня загружаемой руды. На рис. 4 представлена эксплуатационная характеристика бункера, позволяющая оценить влияние данного фактора на эффективность усреднения руды.

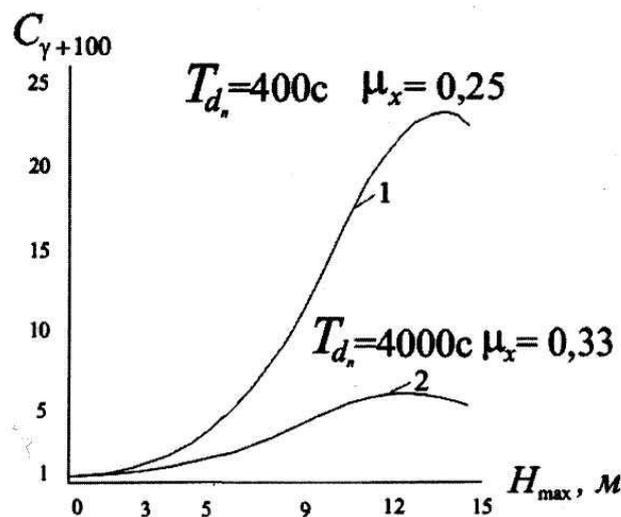


Рис. 4. зависимости степени усреднения от уровня загрузки штабеля:  
1 – без сегрегации; 2 – в условиях сегрегации при загрузке

### Выводы

1. Выявлено, что основным фактором, влияющим на гранулометрический состав загружаемой руды, – номинальная крупность продуктов дробления. Предложена теоретико-вероятностная схема моделирования грансостава загружаемой руды, основанная на установленных регрессионных зависимостях выхода узких классов (0-50 мм, 50-100 мм) от номинальной крупности и учета стохастических составляющих отклонений от средних значений для классов 0-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-250, 250-300 и 300-350 мм. При

предлагаемой схеме можно исключить систематическую ошибку моделирования, которая возникает с использованием известных зависимостей Андреева-Шумана и Розина-Раммлера.

2. Исследованы усреднительные свойства типового бункера, включенного в технологическую схему крупного дробления, в результате чего установлены новые закономерности эффективности усреднения руды по гранулометрическому составу в бункере ящичного (силосного) типа в зависимости от изменения крупности (содержания расчетного класса крупности + 100 мм) в потоке загружаемой руды и степени раскрытия площади днища бункера.

3. Установлено, что бункер – широкополосный сглаживающий фильтр с амплитудно-частотной характеристикой экстремального вида, который уменьшает среднеквадратическое отклонение содержания класса +100 мм в руде в диапазоне частот  $0,157 / \Delta\tau - 1,57 / \Delta\tau$  рад/с в 8,5-25 раз при отсутствии сегрегации и в 1,2-5,6 раз при ее наличии во время загрузки.

4. Из-за снижения колеблемости крупности продуктов дробления в условиях сегрегационных процессов при загрузке бункера постепенно ухудшаются его усреднительные свойства, сужаются полосы сглаживания и изменяется режим усреднения на режим генерирования колебаний крупности руды.

5. Установленные особенности технологических свойств бункера обуславливают необходимость рационального выбора размеров выпускного отверстия и границ изменения качественных характеристик процесса дробления повышения эффективности усреднения гранулометрического состава руды.

### Список литературы

1. **Панич Ю.В., Панкин М.З.** Математическая модель загрузки и истечения сыпучих материалов из накопительных емкостей с целью усреднения руд // Обогащение руд. – 1977. – № 3. – С. 6-10.

2. **Панич Ю.В., Пайкин М.З.** Оптимизация процесса усреднения при пульсирующем режиме работы бункера в условия сегрегации руды при загрузке // Изв. вузов. Горн. журн. – 1980. – № 10. – С. 110-117.

3. **Фиалко М.Г.** Параметры процесса разгрузки бункеров обогатительных фабрик // Изв. вузов. Горн. Журн. – 1983. – №6. – С. 122-124.

4. **Фиалко М. Г.** Стабилизация качества руды на асбестообогатительных фабриках // Автоматическое управление технологическими процессами в горной промышленности.: Межвуз. науч.-темат. сб. Свердлов. горн. ин-т. – Свердловск, 1984. – С. 65-68.

5. **Исаенко А.Н., Качан Ю.Г.** Математическая модель прогнозирования гранулометрического состава руды на выходе бункеров // Металлургия: Тр. ЗГИА. – 2001. – Вып.4. – С. 5-14.

6. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Наука. – 1984. – С. 365.

7. **Исаенко А.Н., Качан Ю.Г.** Распределение гранулометрического состава руды при ее