

УДК 622.73.764

## Закономерности измельчения бедных медно-никелевых руд в барабанных мельницах

А.И. Ракаев, П.А. Шумилов

Горный институт КНЦ РАН

**Аннотация.** В работе приведены результаты исследований измельчаемости пробы бедной медно-никелевой руды, показаны различия в поведении узких классов крупности при стержневом и шаровом помоле, выделены характерные механизмы разрушения этих классов, приведена оценка затрат энергии на измельчение. На основании полученных данных обоснован выбор двухстадийной схемы измельчения со стержневой мельницей в первой стадии, и шаровой – во второй, для рациональной подготовки руды к флотации.

**Abstract.** The paper presents the investigation results of grindability of copper-nickel ore sample, differences in the behavior of narrow grain size categories using rod and ball mill grinding. The characteristic mechanisms of destruction of the categories have been identified; the energy input on grinding has been estimated. Basing on the obtained data the choice of a two-stage scheme of grinding with rod mill at the first stage, and the ball mill at the second one for efficient ore preparation for flotation has been substantiated.

**Ключевые слова:** измельчение, рудоподготовка, стержневая мельница, шаровая мельница, двухстадийное измельчение

**Key words:** grinding, ore preparation, rod mill, ball mill, two-stage grinding

### 1. Введение

В последнее время наблюдается тенденция к усложнению технологических процессов и повышению затрат на обогащение полезных ископаемых. Это связано в первую очередь с исчерпанием ресурсов, вовлечением в разработку бедных, труднообогатимых и труднодоступных месторождений, а также отвалов. В период глобального финансового кризиса ситуация лишь обострилась. Снизившийся спрос на продукты добычи и переработки полезных ископаемых напрямую влияет на экономическую эффективность технологий обогащения.

Процессы рудоподготовки (дробление, измельчение и грохочение) занимают среди всех обогатительных процессов особое место, являясь наиболее энергоемкими, металлоемкими и трудоемкими. На них, по некоторым данным, приходится до 50 % потерь при обогащении. Таким образом, оптимизация процессов рудоподготовки в целом и измельчения в барабанных мельницах в частности является актуальной научно-технической задачей.

Для исследования закономерностей измельчения в барабанных мельницах в нашей стране традиционно применяется интегральный подход – изучение кинетики измельчения остатка на сите. Данная методика, при ее распространенности и изученности, тем не менее, обладает определенными недостатками. Подобный подход дает мало информации о поведении в процессе помола узких классов крупности. А эта информация зачастую необходима для оценки раскрытия ценного компонента и разработки технологий рудоподготовки, позволяющих достичь оптимальных показателей без переизмельчения и излишнего ошламования.

За рубежом для оценки измельчаемости узких классов крупности используется также матричная модель дробильно-измельчительных процессов (*Broadbent, Callcott, 1956*). В России исследователи чаще опираются на кинетическую модель, имеющую в своей основе уравнение кинетики Разумова (*Андреев и др., 1959*). Используемый нами подход совмещает два вышеупомянутых – базируется на усовершенствованном уравнении Товарова, более точно отображающем характер измельчения в стержневых мельницах (*Ракаев, 1989*), но при этом позволяет определять закономерности сокращения крупности частиц в узких классах крупности, оценить интенсивность раскрытия в них ценных компонентов и установить очередность их вступления в процесс измельчения.

### 2. Исследование закономерностей измельчения

Используемое в исследованиях модифицированное уравнение кинетики Разумова (в дифференциальной форме) выглядит следующим образом:

$$a(R,t) = dR/dt = C \cdot (R^2 / R_0) - kR, \quad (1)$$

где  $R_0, R$  – содержание остатка руды на выбранном сите (расчетный класс) в начальный момент времени  $t_0$  и в текущий момент времени  $t$ , %;  $k$  – относительная скорость измельчения, характеризующая измельчаемость мелких классов остатка в данный момент времени, 1/с;  $C$  – коэффициент, характеризующий измельчаемость более крупных классов, 1/с.

Для оценки интенсивности изменения количества ценного компонента (скорости раскрытия) в расчетном классе крупности использовалась формула аналогичная (1):

$$a(\varepsilon, t) = d\varepsilon/dt = C_\varepsilon \cdot (\varepsilon^2/\varepsilon_0) - k_\varepsilon \varepsilon, \quad (2)$$

где  $k_\varepsilon, C_\varepsilon$  – коэффициенты, характеризующие удельные скорости (интенсивности) изменения количества ценного компонента в мелких и крупных классах остатка;  $\varepsilon_0, \varepsilon$  – количество ценного компонента в расчетном классе в начальный и текущий момент времени соответственно, %.

Поведение узких классов крупности исследовалось на примере измельчения бедной медно-никелевой руды в стержневой и шаровой мельницах (рис. 1).

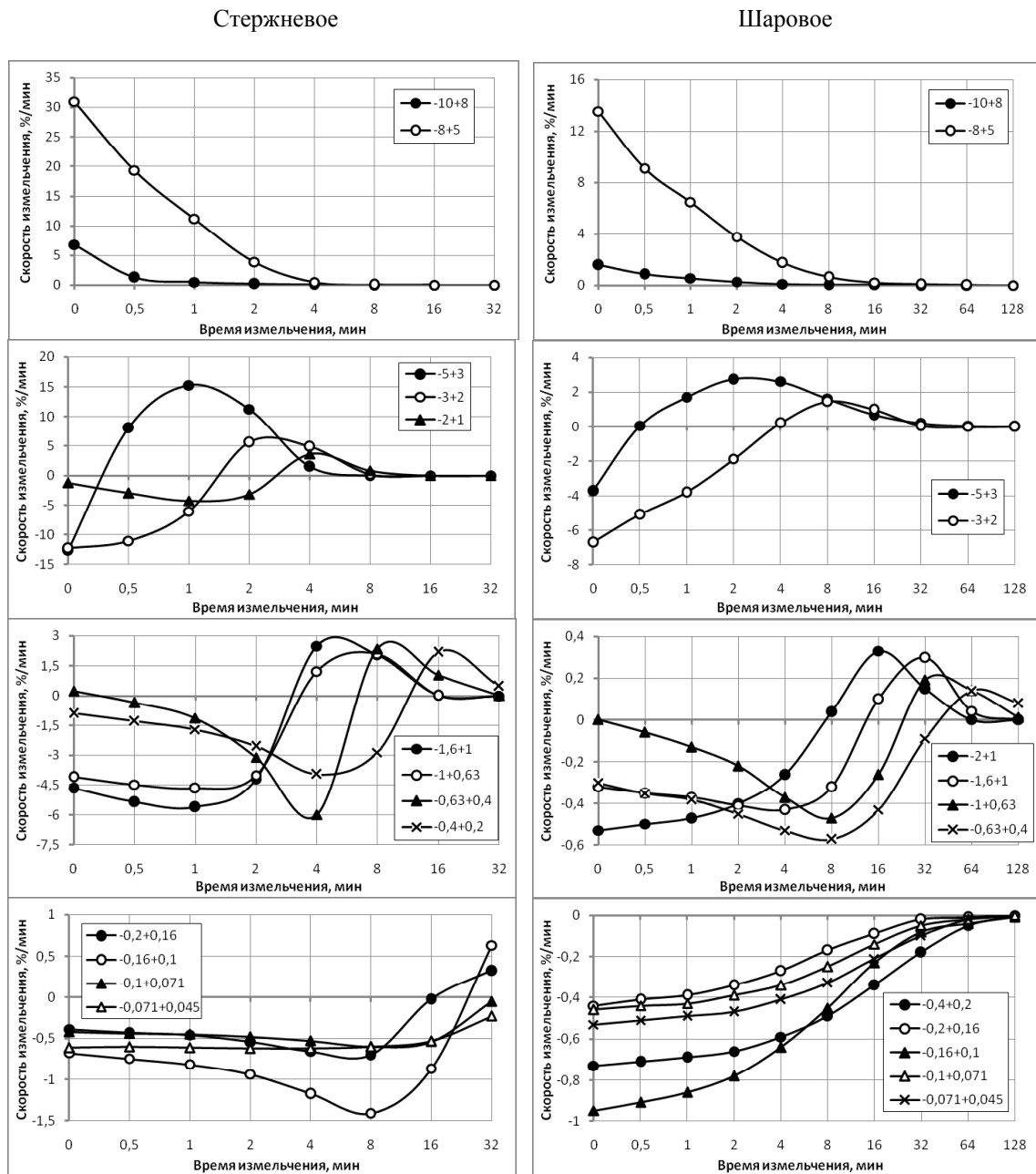


Рис. 1. Скорости измельчения узких классов крупности в стержневой и шаровой мельницах

При стержневом измельчении в начальный период времени ( $t_H = 0-4$  мин) разрушаются частицы только двух самых крупных классов  $-10+8$  мм и  $-8+5$  мм. Скорости их измельчения в начальный момент времени ( $t_0 = 0$  мин) составляют соответственно 6.8 %/мин и 30.9 %/мин. Именно эти классы задают темп стержневого измельчения.

В остальных классах скорости измельчения имеют отрицательные значения. Это свидетельствует о том, что в них в этот период интенсивнее происходит накопление материала за счет продуктов разрушения крупных классов, нежели разрушение. Это относится к классу  $-5+3$  мм, который менее чем через  $t = 0.3$  мин вступает в процесс разрушения. Затем в этот процесс вступают следующие классы:  $-3+2$  мм и  $-2+1$  мм. Происходит это в момент исчезновения частиц крупных классов  $-10+8$  мм и  $-8+5$  мм. В этом интервале времени в классах мельче 1.6 мм накопление материала превалирует над процессами разрушения. Время, после которого процесс разрушения начинает превышать накопление в более мелких классах, составляет:  $-3+2$  мм – 1.5 мин;  $-2+1$  мм – 3 мин;  $-1.6+1$  мм и  $-1+0.63$  мм – 2.5 мин, и т.д. Только в классах мельче 0.1 мм на всем интервале времени ( $t_K = 32$  мин) накопление материала превышает разрушение.

Аналогично происходит разрушение руды и в шаровой мельнице, но его интенсивность гораздо ниже. Здесь крупные классы  $-10+8$  мм и  $-8+5$  мм исчезают только к 16 мин, тогда как в стержневой мельнице это происходит через 4 мин от начала измельчения. В дальнейшем активно разрушается только фракция крупностью  $-5+3$  мм (от  $t_H = 0.5$  мин до  $t_K = 32$  мин). Скорость измельчения этого класса достигает максимального значения около 3 %/мин при  $t = 2$  мин. В то же время в стержневой мельнице эта фракция измельчается со скоростью 15 %/мин при  $t = 1$  мин.

Вопреки ожиданию, в шаровой мельнице частицы мельче 0.4 мм имеют отрицательную скорость на всем интервале времени измельчения ( $t_K = 128$  мин). Начиная с  $t = 8$  мин, когда исчезают самые крупные классы ( $-10+8$  мм и  $-8+5$  мм), процесс разрушения активно поддерживается за счет классов промежуточной крупности:  $-2+1.6$  мм,  $-1.6+1$  мм и  $-1+0.63$  мм до  $t = 64$  мин. На конечном интервале времени, начиная с  $t = 64$  мин до  $t = 128$  мин, измельчаются только частицы класса  $-1.6+1$  мм со скоростью около 0.05 %/мин и класса  $-0.63+0.4$  мм со скоростью несколько большей (0.10-0.15 %/мин).

Приведенный анализ измельчаемости узких классов крупности проявляется во всех опытах, и он достаточно убедительно показывает, что почти 50 % времени в шаровой мельнице материал практически не измельчается. В стержневой же мельнице во вторую половину периода измельчения ( $t = 16-32$  мин) процесс измельчения поддерживается частицами класса  $-0.63+0.4$  мм и  $-0.4+0.2$  мм, причем наибольшую скорость измельчения имеет класс  $-0.4+0.2$  мм. Скорость разрушения в среднем равна 1.5 %/мин, что на порядок больше, чем при шаровом измельчении во второй половине периода, а также за счет измельчения классов  $-0.2+0.16$  мм и  $-0.16+0.1$  мм (средняя скорость 0.25-0.4 %/мин).

Отчетливо проявляются преимущества стержневой мельницы: к моменту времени  $t = 32$  мин выход кл.  $-0.071$  мм достигает 59.26 % (см. табл. 1). В шаровой же мельнице к этому времени содержание кл.  $-0.071$  мм достигает всего 26.79 % (см. табл. 2).

Таблица 1. Кинетика измельчения руды в стержневой мельнице

| Класс<br>крупности, мм       | Выход классов крупности, % |             |             |             |             |              |              |              |    |     |
|------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|----|-----|
|                              | 0                          | 0.5         | 1           | 2           | 4           | 8            | 16           | 32           | 64 | 128 |
| <b>+10</b>                   | 0.66                       | 0.26        | 0.17        | -           | -           | -            | -            | -            | -  | -   |
| <b>-10+8</b>                 | 2.34                       | 0.77        | 0.69        | 0.11        | -           | -            | -            | -            | -  | -   |
| <b>-8+5</b>                  | 30.66                      | 16.63       | 12.68       | 2.57        | -           | -            | -            | -            | -  | -   |
| <b>-5+3</b>                  | 31.74                      | 31.49       | 25.46       | 12.69       | 0.54        | -            | -            | -            | -  | -   |
| <b>-3+2</b>                  | 10.10                      | 16.00       | 18.30       | 22.29       | 5.85        | -            | -            | -            | -  | -   |
| <b>-2+1.6</b>                | 5.61                       | 7.05        | 8.25        | 12.21       | 12.51       | -            | -            | -            | -  | -   |
| <b>-1.6+1</b>                | 5.50                       | 7.73        | 9.38        | 13.34       | 21.14       | 1.27         | -            | -            | -  | -   |
| <b>-1+0.63</b>               | 3.85                       | 5.71        | 6.90        | 10.23       | 16.95       | 4.84         | -            | -            | -  | -   |
| <b>-0.63+0.4</b>             | 2.51                       | 3.68        | 4.82        | 6.84        | 11.58       | 28.09        | 1.02         | -            | -  | -   |
| <b>-0.4+0.2</b>              | 3.06                       | 4.18        | 5.32        | 7.60        | 12.24       | 27.52        | 29.16        | 1.12         | -  | -   |
| <b>-0.2+0.16</b>             | 0.55                       | 0.81        | 1.04        | 1.50        | 2.47        | 4.65         | 9.79         | 3.68         | -  | -   |
| <b>-0.16+0.1</b>             | 1.25                       | 1.71        | 2.20        | 3.14        | 5.15        | 10.19        | 19.51        | 21.20        | -  | -   |
| <b>-0.1+0.071</b>            | 0.60                       | 0.88        | 1.14        | 1.56        | 2.64        | 5.03         | 9.11         | 14.74        | -  | -   |
| <b>-0.071+0.045</b>          | 0.63                       | 0.92        | 1.23        | 1.83        | 2.99        | 5.61         | 10.06        | 16.44        | -  | -   |
| <b>-0.045</b>                | 0.94                       | 2.18        | 2.43        | 4.09        | 5.94        | 12.80        | 21.35        | 42.82        | -  | -   |
| <b>Прод. класс -0.071 мм</b> | <b>1.57</b>                | <b>3.10</b> | <b>3.66</b> | <b>5.92</b> | <b>8.94</b> | <b>18.41</b> | <b>31.41</b> | <b>59.26</b> | -  | -   |

Таблица 2. Кинетика измельчения руды в шаровой мельнице

| Класс<br>крупности, мм       | Выход классов крупности, % |             |             |             |             |             |              |              |              |              |
|------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                              | 0                          | 0.5         | 1           | 2           | 4           | 8           | 16           | 32           | 64           | 128          |
| +10                          | 0.66                       | 0.41        | 0.37        | 0.36        | 0.30        | 0.21        | 0.19         | 0.15         | 0.12         | 0.07         |
| -10+8                        | 2.34                       | 1.69        | 1.14        | 0.97        | 0.93        | 0.75        | 0.40         | 0.26         | 0.06         | 0.06         |
| -8+5                         | 30.66                      | 20.50       | 20.09       | 16.52       | 12.68       | 11.47       | 2.46         | 2.17         | 0.74         | 0.72         |
| -5+3                         | 31.74                      | 31.98       | 27.77       | 29.09       | 23.71       | 18.78       | 2.81         | 1.33         | 0.81         | 0.76         |
| -3+2                         | 10.10                      | 14.64       | 17.95       | 15.90       | 15.31       | 15.55       | 4.98         | 1.23         | 0.72         | 0.63         |
| -2+1.6                       | 5.61                       | 6.37        | 5.96        | 6.21        | 7.42        | 7.22        | 6.28         | 1.71         | 0.51         | 0.92         |
| -1.6+1                       | 5.50                       | 6.49        | 6.58        | 7.09        | 7.90        | 8.15        | 9.19         | 4.57         | 1.13         | 1.48         |
| -1+0.63                      | 3.85                       | 4.79        | 5.24        | 5.56        | 6.44        | 6.65        | 8.26         | 7.91         | 2.66         | 2.46         |
| -0.63+0.4                    | 2.51                       | 3.34        | 3.88        | 4.51        | 5.32        | 5.78        | 15.00        | 11.34        | 4.87         | 5.78         |
| -0.4+0.2                     | 3.06                       | 3.91        | 4.26        | 5.24        | 6.94        | 8.04        | 8.58         | 18.19        | 17.82        | 15.09        |
| -0.2+0.16                    | 0.55                       | 0.71        | 0.82        | 1.04        | 1.40        | 1.94        | 4.16         | 5.22         | 5.99         | 4.09         |
| -0.16+0.1                    | 1.25                       | 1.66        | 1.84        | 2.28        | 3.39        | 4.21        | 10.12        | 12.28        | 13.98        | 11.26        |
| -0.1+0.071                   | 0.60                       | 0.80        | 0.95        | 1.20        | 1.73        | 2.22        | 5.49         | 6.85         | 7.58         | 6.96         |
| -0.071+0.045                 | 0.63                       | 0.96        | 1.04        | 1.39        | 2.14        | 2.70        | 6.93         | 8.77         | 9.53         | 9.72         |
| -0.045                       | 0.94                       | 1.73        | 2.12        | 2.63        | 4.40        | 6.32        | 15.15        | 18.03        | 33.49        | 40.01        |
| <b>Прод. класс -0.071 мм</b> | <b>1.57</b>                | <b>2.69</b> | <b>3.16</b> | <b>4.02</b> | <b>6.54</b> | <b>9.02</b> | <b>22.08</b> | <b>26.79</b> | <b>43.02</b> | <b>49.73</b> |

Даже к конечному времени ( $t = 128$  мин) содержание кл. -0.071 мм составляет около 50 %, тогда как для данных руд оптимальная крупность составляет не менее 90 % кл. -0.071 мм. Добиться такой крупности помола возможно путем перехода на двухстадиальное измельчение при использовании стержневой мельницы в I стадии.

Время измельчения руды в мельницах можно выбрать исходя из данных, приведенных на рис. 1. Отчетливо видно, что при  $t = 4$  мин частицы крупнее 2 мм практически измельчены. Для стержневой мельницы оптимальная крупность помола руды составляет около 2 мм. Этот режим достигается в момент исчезновения основной массы крупных классов. По времени это составляет около  $t = 5$  мин (см. рис. 1). В этот момент в процесс разрушения начинают активно вовлекаться классы руды мельче 2 мм. Благодаря этому режиму успешно достигается основная цель измельчения: содержание продуктивного кл. -0.071 мм в продукте конечного измельчения (разгрузке шаровой мельницы) составляет более 90 %. Время достижения данной крупности составляет  $t = 128$  мин. При этом в I стадии используется стержневая мельница ( $t = 5$  мин), в которой руда измельчается до крупности -2 мм (табл. 3).

Таблица 3. Результаты двухстадиального измельчения

| Класс<br>крупности, мм       | Выход классов крупности, % |              |              |              |              |              |              |              |              |    |
|------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|
|                              | Исх. руда                  | I стадия     | II стадия    |              |              |              |              |              |              |    |
|                              |                            |              | 0            | 5            | 2            | 4            | 8            | 16           | 32           | 64 |
| +10                          | 0.66                       | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -  |
| -10+8                        | 2.34                       | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -  |
| -8+5                         | 30.66                      | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -  |
| -5+3                         | 31.74                      | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -  |
| -3+2                         | 10.10                      | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -            | -  |
| -2+1.6                       | 5.61                       | 1.50         | 1.10         | 0.59         | -            | -            | -            | -            | -            | -  |
| -1.6+1                       | 5.50                       | 14.29        | 9.77         | 3.73         | 0.63         | -            | -            | -            | -            | -  |
| -1+0.63                      | 3.85                       | 24.50        | 20.91        | 13.87        | 3.79         | -            | -            | -            | -            | -  |
| -0.63+0.4                    | 2.51                       | 16.78        | 18.25        | 20.51        | 13.19        | 1.27         | -            | -            | -            | -  |
| -0.4+0.2                     | 3.06                       | 17.28        | 19.61        | 24.18        | 30.74        | 22.07        | 3.43         | -            | -            | -  |
| -0.2+0.16                    | 0.55                       | 3.07         | 3.56         | 4.68         | 6.63         | 8.98         | 5.00         | 1.33         | -            | -  |
| -0.16+0.1                    | 1.25                       | 6.73         | 7.83         | 9.72         | 13.19        | 19.53        | 19.98        | 9.48         | 3.21         | -  |
| -0.1+0.071                   | 0.60                       | 3.41         | 3.88         | 4.68         | 6.76         | 9.04         | 13.42        | 12.64        | 6.23         | -  |
| -0.071+0.045                 | 0.63                       | 3.65         | 4.27         | 5.10         | 7.58         | 10.37        | 15.96        | 18.76        | 16.24        | -  |
| -0.045                       | 0.94                       | 8.80         | 10.81        | 12.92        | 17.49        | 28.74        | 42.21        | 57.80        | 74.32        | -  |
| <b>Прод. класс -0.071 мм</b> | <b>1.57</b>                | <b>12.46</b> | <b>15.08</b> | <b>18.02</b> | <b>25.06</b> | <b>39.11</b> | <b>58.18</b> | <b>76.55</b> | <b>90.56</b> | -  |

Как видно из табл. 3, содержание кл. -0.071 мм более 90 % в конечном продукте (разгрузке шаровой мельницы) достигается за то же время ( $t = 128$  мин), при котором при одностадийной схеме содержание кл. -0.071 мм составляет всего 50 % (см. табл. 2).

Приведенные результаты убедительно показывают, что только переход на двухстадийное измельчение, при котором полностью проявляются преимущества стержневой мельницы (первоочередное разрушение крупных кусков и подготовка материала к измельчению в шаровой мельнице), позволяет достичь требуемых результатов.

Выполнена сравнительная оценка энергозатрат при одностадийном (табл. 4) и двухстадийном измельчении.

Таблица 4. Энергозатраты при одностадийном измельчении

| Время измельчения, мин | Энергозатраты на измельчение, кВт*ч/т |         |
|------------------------|---------------------------------------|---------|
|                        | стержневое                            | шаровое |
| <b>T = 0.5</b>         | 40.27                                 | 29.66   |
| <b>T = 1</b>           | 58.92                                 | 41.73   |
| <b>T = 2</b>           | 56.61                                 | 54.18   |
| <b>T = 4</b>           | 66.86                                 | 53.55   |
| <b>T = 8</b>           | 58.51                                 | 71.40   |
| <b>T = 16</b>          | 66.03                                 | 51.85   |
| <b>T = 32</b>          | 68.30                                 | 84.30   |
| <b>T = 64</b>          | -                                     | 102.60  |
| <b>T = 128</b>         | -                                     | 176.61  |

При двухстадийном измельчении для первой стадии оценивались энергозатраты на измельчение исходной руды до содержания 90 % крупности -2 мм (в стержневой и шаровой мельницах). Для стержневой мельницы они составили 7.84 кВт\*ч/т ( $T = 5$  мин), для шаровой -30.22 кВт\*ч/т ( $T = 32$  мин). При этом энергозатраты на измельчение в течение 128 минут в шаровой мельнице после стержневой составили 131.81 кВт\*ч/т, а на измельчение в течение того же периода времени после шаровой – 336.63 кВт\*ч/т. Кривые удельной производительности и энергозатрат приведены на рис. 2.

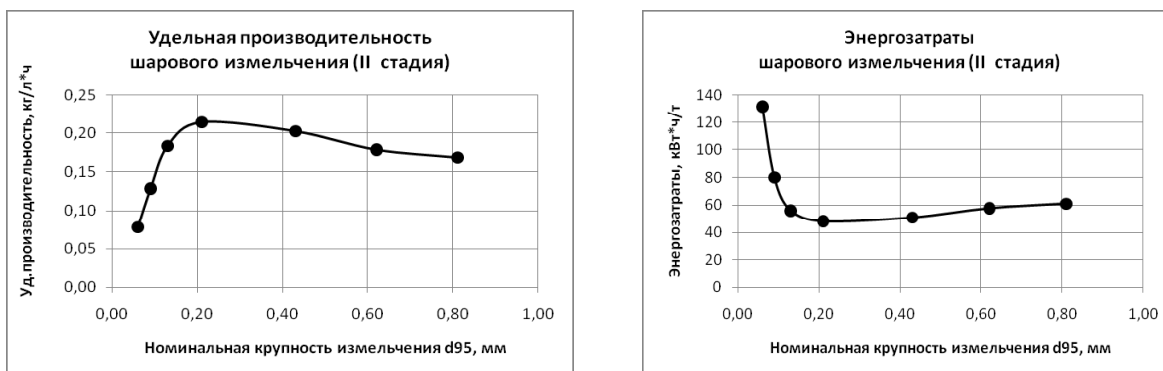


Рис. 2. Показатели шарового измельчения во II стадии, при использовании на I стадии стержневой мельницы

Таким образом, отчетливо видна эффективность схемы двухстадийного измельчения с использованием в первой стадии стержневой мельницы. За меньшее время и с меньшими затратами энергии исходная руда доводится до крупности более 90 % класса -2 мм. Дальнейшее измельчение руды в шаровой мельнице позволяет наработать при минимальных энергозатратах необходимое для флотации количество класса -0.071 мм (90.56 % против 49.73 %, см. табл. 2 и 3).

### 3. Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали различия в измельчаемости узких классов бедной медно-никелевой руды в шаровой и стержневой мельницах. Показано, что в стержневой мельнице в первую очередь разрушаются крупные куски, и скорость измельчения в целом заметно выше, чем в шаровой.

Выделены три основные группы классов: в крупных фракциях происходит преимущественно разрушение руды, в мелких – накопление, в промежуточных классах крупности кривые скоростей

измельчения имеют экстремальный характер. В этих классах накопление сменяется разрушением (на графике – переход из отрицательной области значений в положительную область), четко прослеживается последовательное вовлечение узких классов в процесс измельчения.

По результатам исследований, можно сделать вывод, что стержневое измельчение представляется более эффективным способом подготовки руды к окончательному измельчению руды перед флотацией. Однако даже стержневой помол не дает возможности быстро довести руду до требуемого содержания продуктивного класса. В связи с этим, целесообразным представляется использование двухстадийного измельчения со стержневой мельницей на первой стадии, позволяющей быстро разрушить крупные куски, и дальнейшим доведением руды до нужной крупности в шаровых мельницах.

#### Литература

- Broadbent S.R., Callcott T.G.** A matrix analysis of processes involving particle assemblies. *Phil. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A*, v.249, p.99-123, 1956.
- Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А.** Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. *М., Металлургиздат*, с.284-292, 1959.
- Ракаев А.И.** Оптимизация рудоподготовки при гравитационном обогащении. *Л., Наука*, с.16-21, 1989.