

УДК 622.73

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДРОБИЛКИ  
КОМБИНИРОВАННОГО УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ ДКД-300  
В СХЕМЕ СУХОГО ОБОГАЩЕНИЯ КИМБЕРЛИТОВЫХ РУД ТРУБКИ “ЗАРНИЦА”**

**А. И. Матвеев, Е. С. Львов, Д. А. Осипов**

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
E-mail: andrei.mati@yandex.ru; lvoves @ bk.ru,  
проспект Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Представлены результаты экспериментальных исследований по дезинтеграции кимберлитовых руд в дробилках ударного действия. Приведено обоснование применения предлагаемой дробилки комбинированного ударного действия ДКД-300 в межстадиальном дроблении в схеме сухого обогащения кимберлитовых руд трубки “Зарница”.

*Дробление, дробилка, раскрытие, кимберлитовые руды, сохранность, кристаллы, циркуляционная нагрузка*

Для дробления кимберлитовых руд использование ударных дробилок не рекомендуется в связи с природной хрупкостью алмазов [1]. Вместе с тем при определенных условиях высокая эффективность по степени дробления и раскрытию минеральных форм [2] может являться основанием для их применения при дроблении кимберлитов. Так, ударные дробилки могут быть рекомендованы для внедрения в схему межстадиального дробления кимберлитовых руд, где требуется додрабывание рудной массы для дораскрытия кристаллов алмазов в формирующихся циркулирующих технологических потоках.

В разрабатываемой схеме сухой рудоподготовки кимберлитовых руд месторождения “Зарница” апробированы ударные роторные дробилки разных зарубежных изготовителей, в частности исследована дробилка Nordberg NP-1007. Принцип работы дробилок данного типа заключается в придании первоначального ускорения частицам вращающимися активаторами и введении ударного столкновения с отбойными плитами, установленными во внутренней стенке дробилки. Энергия ударного воздействия на куски руды определяется скоростью вращения активатора, которая при небольших размерах может достигать высоких значений, в отличие от вращающихся барабанов мельниц самоизмельчения, ограниченных критическим числом вращения.

Однако испытания данной дробилки выявили недостаток, вызванный значительным увеличением циркулирующей нагрузки в схемах рудоподготовки, что связано с недостаточной эффективностью разрушения рудных кусков за один цикл дробления.

---

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ-Арктика 12-05-98516-р\_восток\_a “Определение характера зависимостей степени раскрытия мономинеральных фаз и сохранности их в режиме кристаллосбережения от параметров дезинтеграции геоматериалов многократными динамическими воздействиями”.

Для снижения циркулирующей нагрузки или достижения приемлемой степени дробления на стадии межциклового дробления предложена дробилка комбинированного ударного действия ДКД-300, разработанная в ИГДС СО РАН (рис. 1).

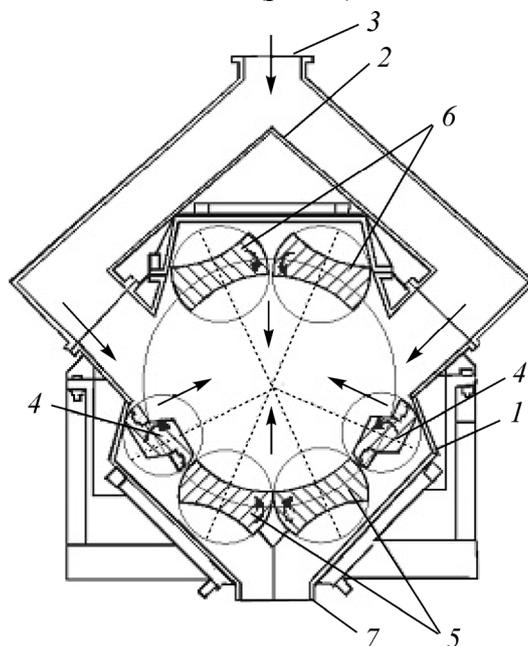


Рис. 1. Схема расположения роторов ДКД-300

Дробилка состоит из корпуса 1, имеющего делитель исходного материала 2, расположенного ниже питающего патрубка 3, пары роторов первичного 4, дополнительного (нижнего) 5 и вторичного 6 дробления, разгрузочного патрубка 7. Центры вращения пар роторов первичного и вторичного дробления размещаются симметрично по линии окружности, образованной одним радиусом от центра корпуса. Таким образом, геометрический центр корпуса совпадает с центром вероятной зоны ударного взаимного столкновения горных пород, вылетающих при ударе рабочей поверхностью всех роторов [3].

Конструктивно в принцип работы дробилки заложен механизм интенсивного разрушения кусковых геоматериалов в режиме многократных динамических воздействий за счет контактов как с рабочей поверхностью роторов, так и кусков друг с другом в режиме самоизмельчения.

Техническая характеристика дробилки ДКД-300 представлена ниже:

Производительность	6–15 т/ч
Установленная мощность	15 кВт
Количество оборотов в мин (электродвигателей)	1500
Исходная крупность дробимого материала	До 150 мм
Крупность дробленого материала	–2 мм
Степень дробления	50–60
Диаметр роторов	300 мм
Габариты	2200×1500×1900 мм
Масса	1500 кг

В ходе проведения технологических испытаний дробилки ДКД-300 на фабрике № 12 Удачинского горно-обогатительного комбината получены положительные результаты [4]. Так, степень дробления кимберлитовых руд для дробилки ДКД-300 составляет: при производитель-

ности 5.8, 12.2 и 15.2 т/ч — соответственно 6.6, 5.3 и 4.8. Наибольшая степень дробления достигается при производительности дробилки 5.8 т/ч. Исследования показали, что во всех случаях степень дробления ДКД-300 существенно выше, чем у роторной дробилки Nordberg NP-1007, где степень дробления в аналогичных условиях равна 3.3.

На рис. 2 приведены кумулятивные кривые грансостава продуктов дробления дробилок ударного действия разных типов, испытанных на алмазосодержащих кимберлитах месторождения “Зарница” в разные годы по данным института ОАО “Иргиредмет” в сравнении с результатами дробления ДКД-300 [4, 5].

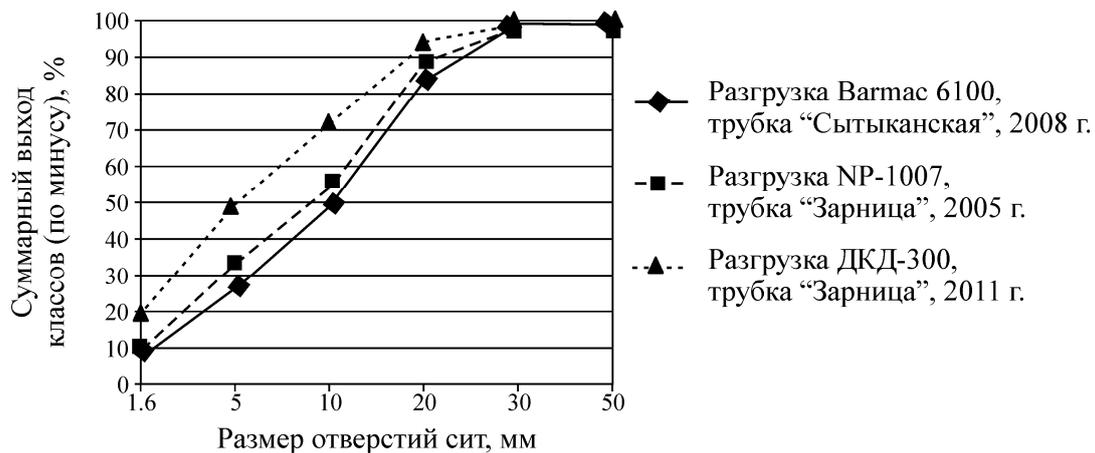


Рис. 2. Кривые крупности продуктов дробления для разного типа роторных дробилок: ДКД-300, NP-1007 и Вармас 6100 VSI

Как видно из рисунка, эффективность дробления руд на дробилке ДКД-300 также выше, что подтверждает рентабельность нового способа дробления, который заключается в организации в рабочей зоне дробления интенсивных динамических воздействий. Наиболее важным результатом исследований является высокая степень сохранности кристаллов при дроблении.

Для оценки сохранности кристаллов алмазов в процессе измельчения рудного материала в дробилке комбинированного действия ДКД-300 использована методика оценки повреждаемости кристаллов, разработанная сотрудниками ОАО “Иргиредмет”, с использованием окрашенных алмазов-индикаторов крупностью – 5 + 2 мм трубки “Удачная” в количестве 650 шт.

В результате исследований (табл. 1) выявлено, что кристаллы, прошедшие через дробилку ДКД-300, в свободном состоянии имеют такой же процент повреждаемости, как при традиционных методах с применением мельниц мокрого самоизмельчения (ММС). При этом сохранность кристаллов алмазов в скрытом состоянии выше примерно в 3 раза, чем в открытом, что определяется щадящим режимом дробления, связанным, прежде всего, с самоизмельчением руды, а также своевременным выводом дробленого материала, в том числе раскрытых кристаллов алмазов из рабочей зоны дробления. При дроблении в мельницах самоизмельчения время пребывания кристаллов алмаза в процессе измельчения велико, вследствие чего кристаллы повреждаются, подвергаясь повторной циркуляции в зоне дробления.

Сохранность кристаллов в схеме межстадиального дробления следует оценивать по показателю поврежденности кристаллов, заброшенных в питание дробилки в скрытом состоянии (в бетонных моделях), так как дробилку ДКД-300 предполагается использовать на установках сухого обогащения взамен роторных дробилок типа NP для додрабливания в основном хвостов обогащения крупностью – 30 + 10 (5) мм, в которых раскрытых алмазов практически не будет.

ТАБЛИЦА 1. Показатели повреждаемости алмазов-индикаторов класса – 5 + 2 мм коллекции трубки “Удачная” в дробилке ДКД-300 и в мельницах ММС фабрики № 12

Место заброса алмазов-индикаторов	Количество нарушенных алмазов-индикаторов, % от извлеченных				
	по видам повреждений			всего	в том числе с потерей массы
	трещины	трещины и сколы	сколы		
Питание ДКД-300, в бетонных моделях	0.3	1.4	1.1	2.8	1.4
Питание ДКД-300, в свободном состоянии	0.7	2.1	6.3	9.1	8.4
Питание мельниц ММС ОФ № 12, в свободном состоянии	5.3	1.6	2.4	9.3	4.4

Результаты проведенных исследований позволяют обосновать возможность применения дробилки комбинированного действия ДКД-300 в схеме межстадиального дробления кимберлитовых руд трубки “Зарница”. Для обоснования применения необходимо рассчитать уровень снижения циркулирующей нагрузки при внедрении дробилки ДКД-300 в проектную схему (рис. 3) с использованием полученных в ходе исследований гранулометрических характеристик продуктов дробления.

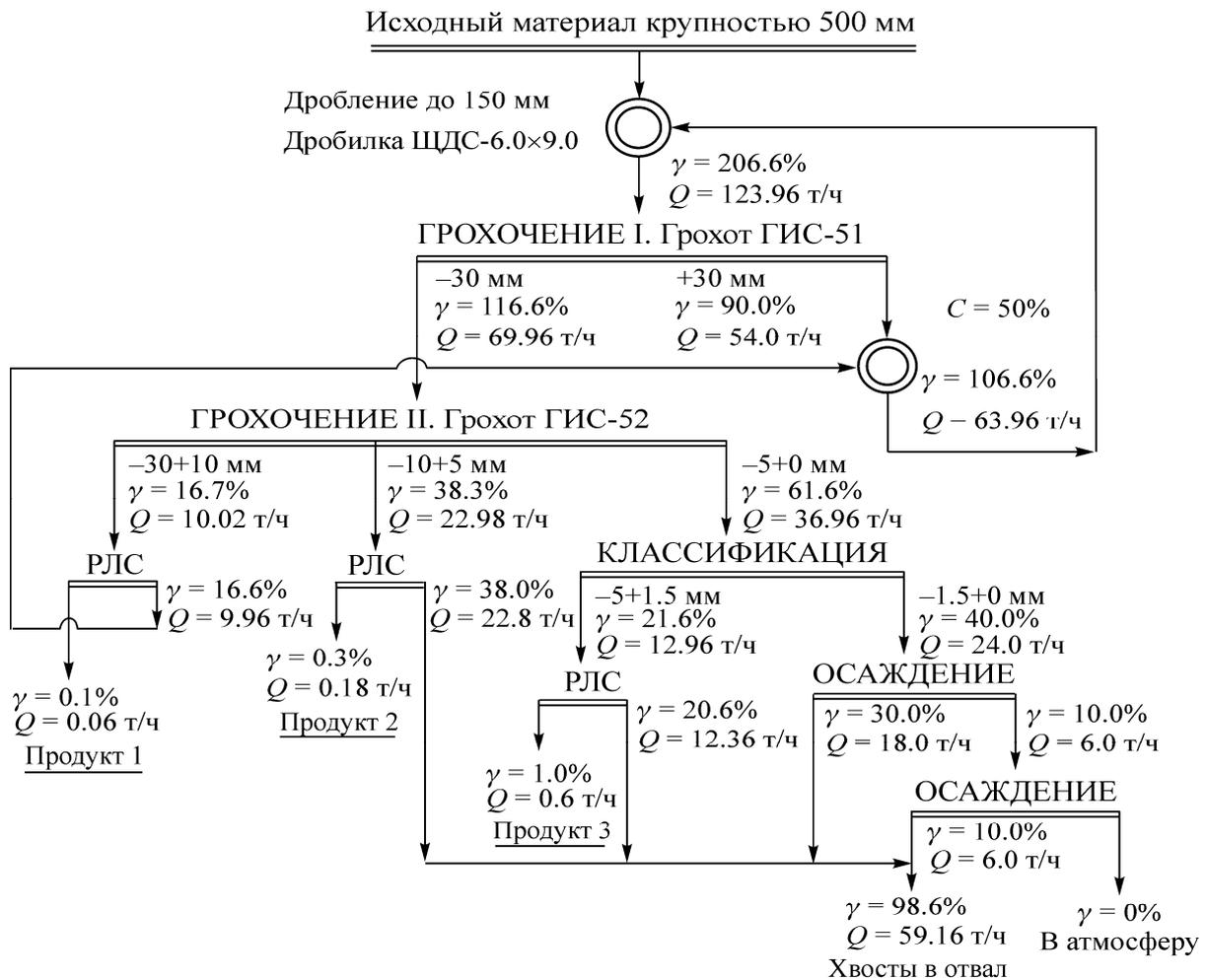


Рис. 3. Проектная схема установки сухого обогащения Айхальского ГОКа (γ — выход продукта, %; Q — количество продукта, т/ч)

Для расчетов принимается грансостав исходной руды, поступающей на грохочение I, такой же, как в испытанной руде при дроблении (табл. 2). Эффективность I стадии грохочения по крупности 30 мм на грохоте ГИС-51 при производительности 145.5 т/ч составляет 92%, при замельчении в надрешетном продукте — 17.7%, а по крупности 10 мм на II стадии грохочения на грохоте ГИС-52 при производительности грохота 98.9 т/ч — 90.1%, при этом измелчение в надрешетном продукте составляет 5.4%.

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрическая характеристика исходной кимберлитовой руды трубки “Зарница”, поступающей на ГИС-51

Класс крупности, мм	Выход, %
– 100 + 50	30.2
– 50 + 35	12.1
– 35 + 20	21.7
– 20 + 10	14.5
– 10 + 5	7.7
– 5 + 2	6.8
– 2 + 1.6	1.5
– 1.6 + 1.2	0.9
– 1.2 + 0.5	1.7
– 0.5	2.9
Итого	100

Производительность узла рудоподготовки принимается в соответствии с продолжительностью грохота ГИС-15 — 150 т/ч.

Перерасчет выходов продуктивных классов крупности при грохочении, принятых в обогащении (+ 50 мм, – 50 + 30 мм, – 30 + 10 мм, – 10 мм) в исходной руде, приведен в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета выходов продуктивных классов крупности (интерполированы)

Класс крупности, мм	Выход, %	Ячейка, мм	Суммарный выход, %	Контрольная крупность, мм	Суммарный выход, %	Класс крупности, мм	Выход, %
– 100 + 50	30.2	50	30.2	50	30.2	+50	30.2
– 50 + 35	12.1	35	42.3	30	49.84	– 50 + 30	19.64
– 35 + 20	21.7	20	64			– 30 + 10	28.66
– 20 + 10	14.5	10	78.5	10	78.5	– 10 + 0	21.5
– 10 + 5	7.7	5	86.2				
– 5 + 2	6.8	2	93				
– 2 + 1.6	1.5	1.6	94.5				
– 1.6 + 1.2	0.9	1.2	95.4	0	100		
– 1.2 + 0.5	1.7	0.5	97.1				
– 0.5	2.9	0	100				
Итого	100						100

На I стадии грохочения с учетом эффективности  $E_{30} = 92\%$  выход продуктов + 30 и – 30 мм без учета циркулирующей нагрузки составит:

$$Y_{+30} = P_{+30} + (100 - E_{30}) \cdot P_{-30} = 49.84 + (100 - 92) \cdot 50.16/100 = 53.85\%,$$

где  $P_{+30}$ ,  $P_{-30}$  — суммарное распределение материалов + 30 и – 30 мм соответственно.

Доля выхода мелких классов в надрешетный продукт отсева, определяющая замельченность, будет:

$$Z_{+30} = +(100 - 92) \cdot 50.16 / 100 = 4.01\%,$$

причем замельченность надрешетного продукта отсева составит:

$$Z_{+30}^{+30} = +(100 - 92) \cdot 50.16 / 53.85 = 7.45\%.$$

При этом допускается распределение классов  $-30 + 10$  мм и  $-10$  мм пропорционально соотношению их содержания в исходной руде (питание грохота ГИС-51). Следовательно, замельченность  $Z_{+30}$  равна сумме замельченности классов  $-30 + 10$  мм и  $-10$  мм в надрешетном продукте отсева:

$$\begin{aligned} Z_{+30} &= Z_{+30}^{-30+10} + Z_{+30}^{-10} = Z_{+30} (P^{-30+10} / P^{-30}) + Z_{+30} (P^{-10} / P^{-30}) = \\ &= 4.01 \cdot 28.66 / 50.16 + 4.01 \cdot 21.5 / 50.16 = 4.26 + 3.19 = 4.01, \\ Z_{+30}^{-30+10} &= 2.29\%, \quad Z_{+30}^{-10} = 1.72\%. \end{aligned}$$

Выход класса  $-30$  мм составит  $Y_{-30} = 100 - Y_{+30} = 100 - 53.85 = 46.15\%$ , который переходит на II стадию грохочения, и нас интересует разделение материалов на границе  $10$  мм. Класс  $-30 + 10$  мм является возвратным и представляет основу для циркуляции на дробилку ДКД-300.

Выход данного продукта в надрешетном продукте составит:

$$\begin{aligned} Y_{-30+10} &= (P_{-30+10} - Z_{+30}^{-30+10}) + (100 - E_{10})(P_{-10} - Z_{+30}^{-10}) / 100 = \\ &= (28.66 - 4.26) + (100 - 90.1)(21.5 - 1.72) / 100 = 28.33\%, \end{aligned}$$

где  $P_{-30+10}$  — суммарное распределение материалов  $-30 + 10$  мм в исходном продукте (табл. 2);  $P_{-10}$  — суммарное распределение материала  $-10$  мм.

Выход мелочи в надрешетный продукт отсева  $+10$  мм:

$$Z_{-30+10}^{-30} = (100 - E_{10})(P_{-10} - Z_{+30}^{-10}) / 100 = 1.96\%.$$

Ожидаемая замельченность надрешетного продукта отсева  $-30 + 10$  мм равна:

$$(100 - E_{10})(P_{-10} - Z_{+30}^{-10})(P_{-30+10} - Z_{+30}^{-30+10}) = (100 - 90.1)(21.5 - 1.72) / (28.66 - 2.29) = 6.91\%.$$

Распределение технологических потоков за счет последовательного грохочения по крупности  $30$  и  $10$  мм представлено в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Расчет материальных потоков в цикле рудоподготовки без учета циркуляции, %

Класс крупности, мм	Технологический поток			
	+ 30	- 30 + 10	- 10	Всего
50	30.2	—	—	30.2
- 50 + 30	19.64	—	—	19.64
- 30 + 10	2.29	26.37	—	28.66
- 10	1.72	1.96	17.82	21.5
Выход	53.85	28.33	17.82	100.00
Выход, т/ч	80.78	42.49	26.73	150.00
Эффективность грохочения	92	90.1	—	—
Замельченность	7.45	6.91	—	—

Суммарный поток на дробление в дробилку ДКД-300 составит:

$$Q_{\text{ДКД}} = Y_{+30} + Y_{-30+10} = 53.85 + 28.33 = 82.12\% .$$

Продукт дробления является возвратным в головном грохочении I.

Циркуляционная нагрузка напрямую зависит от эффективности дробления. Проанализируем результаты дробления руды в дробилке LRL-300. В табл. 5 приведены гранулометрические характеристики исходной руды и продуктов дробления при максимальной производительности 15.2 т/ч. Анализ убыли и накопления по классам крупности показывает четкое дробление классов +20 мм и перераспределение материалов в мелкие классы.

ТАБЛИЦА 5. Анализ гранулометрии продуктов дробления относительно грансостава исходной руды, %

Класс крупности, мм	Исходная руда	Продукт дробления при $Q = 15.2$ т/ч	Убыль	Накопление	Распределение дробленой массы	Грансостав дробленых продуктов
-0.5	2.90	9.50		6.60	6.60	10.31
-1.2 + 0.5	1.70	5.90		4.20	4.20	6.56
-1.6 + 1.2	0.90	3.50		2.60	2.60	4.06
-2 + 1.6	1.50	5.40		3.90	3.90	6.09
-5 + 2	6.80	24.60		17.80	17.80	27.81
-10 + 5	7.70	22.70		15.00	15.00	23.44
-20 + 10	14.50	23.50		9.00	9.00	14.06
-30 + 20	14.16	3.74	-10.42	—	3.74	5.84
-50 + 30	19.64	1.16	-18.48	—	1.16	1.81
-100 + 50	30.20	0.00	-30.20	—	0.00	0.00
Итого	100.00	100.00	-59.10	59.10	64.00	100.00

С учетом того, что мелкие классы руды в меньшей степени подвергаются дроблению, определяем гранулометрический состав кусков руды, подвергаемых разрушению, за вычетом недробимой разницы (мелкие классы в исходной руде). Дробленый продукт подвергается двухстадиальному грохочению по ячейке 30 и 10 мм, надрешетные продукты составляют основу циркуляционной нагрузки на дробилку ДКД-300.

В табл. 6 показан выход суммарных классов крупности с учетом гранулометрии продуктов дробления от исходного по циркуляционным циклам (возврат непродробленных кусков). Расчет проведен до 8 циклов, пока не появляются значения, не влияющие на окончательную величину определяемых потоков на два знака после нуля. Для классов -30 + 10 мм учитывается разделение концентратов на РЛС в количестве 5 %, хвосты РЛС являются циркуляционной нагрузкой на дробилку.

ТАБЛИЦА 6. Результаты расчетов выхода дробленых продуктов по циклам циркуляции, %

Класс крупности, мм	Исходная руда	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3	Цикл 4	Цикл 5	Цикл 6	Цикл 7	Цикл 8
-10 + 0	78.28	64.00	23.23	6.48	1.62	0.38	0.09	0.02	0.0043
-30 + 10	19.91	15.36	3.20	0.66	0.14	0.03	0.01	0.00	0.0003
+30	1.81	1.40	0.29	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0000
На дробление	100.00	77.18	16.06	3.34	0.69	0.14	0.03	0.01	0.0013

В табл. 7 представлен расчет распределения циркулирующей нагрузки после одного цикла аналогично табл. 4. Уровни эффективности грохочения остаются постоянными. Расчет проведен при условии пассивного участия замельченности в надрешетных классах крупности при дроблении.

ТАБЛИЦА 7. Распределение циркулирующей нагрузки после одного цикла по технологическим потокам, %

Класс крупности, мм	Технологический поток			
	+ 30	– 30 + 10	– 10	Всего
+ 50	—	—	—	—
– 50 + 30	1.3989	—	—	1.40
– 30 + 10	1.2291	14.13	—	15.36
– 10	5.1199	5.83	53.05	64.00
Выход	7.75	19.96	53.05	80.76
Выход, т/ч	11.62	29.95	79.58	121.14
Эффективность грохочения	92	90.1	—	—
Замельченность	81.25	28.02	—	—

Аналогично рассчитываются распределения потоков по циклам дробления циркулирующей нагрузки. В сводной табл. 8 приведены результаты распределения материалов по циклам дробления. Число циклов рассчитано из условия значимости расчетных данных до второго знака после нуля.

ТАБЛИЦА 8. Сводная таблица распределения циркулирующей нагрузки по циклам, %

Класс крупности, мм	Технологический поток			
	+ 30	– 30 + 10	– 10	Всего
Исходная руда	53.85	28.33	17.82	100.00
Цикл 1	7.75	19.96	53.05	80.76
Цикл 2	2.40	5.06	19.25	26.71
Цикл 3	0.63	1.20	5.37	7.21
Цикл 4	0.1535	0.2751	1.3457	1.7744
Цикл 5	0.0356	0.0614	0.3179	0.4149
Цикл 6	0.0080	0.0135	0.0725	0.0939
Цикл 7	0.0018	0.0029	0.0161	0.0208
Цикл 8	0.0004	0.0006	0.0035	0.0045
Всего	64.84	54.90	97.25	216.99
Производительность, т/ч	97.26	82.35	145.88	325.49

Таким образом, при внедрении дробилки ДКД-300 в схеме рудоподготовки линии сухого обогащения производительностью 150 т/ч общая нагрузка на процесс дробления составляет 119.74% (потоки + 30 мм, – 30 + 10 мм) или 179.61 т/ч. При этом чистая циркулирующая нагрузка недробленных остатков в схеме составляет всего 37.56% или 56.34 т/ч. Результаты расчетов внесены в качественно-количественную схему рудоподготовки с использованием дробилки ДКД-300 (рис. 4).

Для внедрения ДКД-300 в схему рудоподготовки производительностью 150 т/ч необходимое число дробилок составит  $N = 179.61/15.2 = 11.81 = 12$  шт.

Энергопотребление дробилки, по данным экспериментальных исследований, проведенных при дроблении кимберлитовых руд трубки “Зарница” на фабрике № 12 Удачинского ГОКа, составляет 0.86 кВт·ч/т при производительности 15.2 т/ч. Суммарное энергопотребление дробилок  $\Sigma P = 179.61 \cdot 0.86 = 154.46$  кВт·ч.

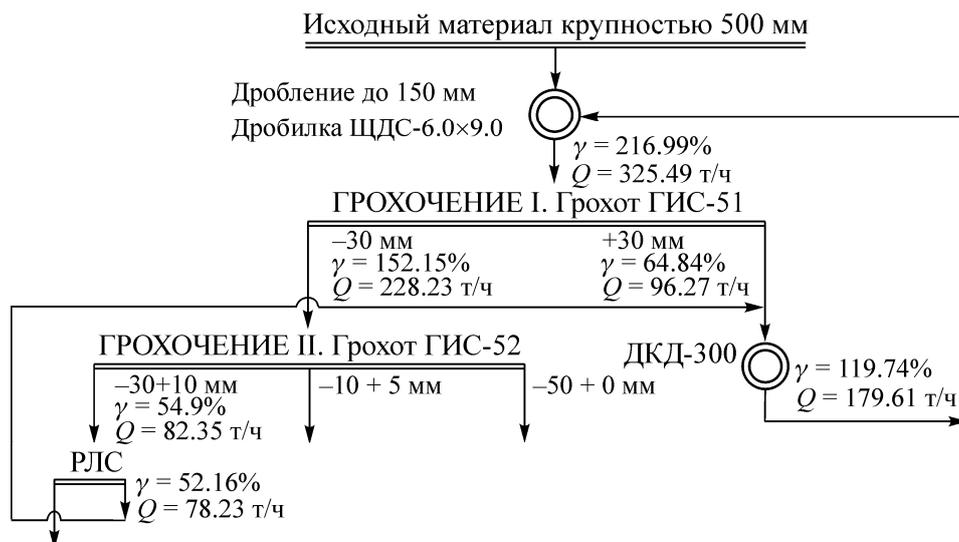


Рис. 4. Схема рудоподготовки с использованием дробилки ДКД-300 в разрабатываемой линии сухого обогащения производительностью 1 млн т в год ( $\gamma$  — выход продукта, %;  $Q$  — количество продукта, т/ч)

Естественно, такое количество дробилок устанавливать в схему нерационально. Поэтому предложен новый типоразмер ударной дробилки с высокой производительностью.

#### ВЫВОДЫ

1. При дроблении кимберлитовых руд крупностью –150 мм степень дробления на дробилке комбинированного действия ДКД-300 выше в 1.65 раза по сравнению с дробилкой Nordberg NP-1007.
2. Оценка сохранности кристаллов алмазов показала, что повреждаемость кристаллов алмазов, поступающих в свободном состоянии в питание дробилки ДКД-300, составляет 9.1 %, что примерно равно показателю испытаний в мельницах мокрого самоизмельчения, но в 3 раза ниже при подаче алмазов в скрытом состоянии (в бетонных моделях).
3. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о возможности применения дробилки комбинированного действия ДКД-300 в схеме межстадиального дробления кимберлитовых руд трубки “Зарница”. Для успешной реализации данного предложения необходимо проектирование и изготовление нового типоразмера данной дробилки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Б. В., Зуев В. В., Вайншенкер И. А., Митенко Г. А. Минералогический справочник технолога-обогапителя. 2-е изд. — Л.: Недра, 1985.
2. Матвеев А. И., Львов Е. С. Исследование раскрытия минералов флюорита в процессе ударного дробления, осуществляемого в дробилке комбинированного действия ДКД-300 // ГИАБ. — 2011. — № 10.
3. Патент № 2111055 РФ. Дробилка комбинированного ударного действия / А. И. Матвеев, В. П. Винокуров, А. Н. Григорьев, А. М. Монастырев // Оpubл. в БИ. — 1998. — № 14.
4. Григорьев Ю. М., Матвеев А. И., Прокапенко А. В., Савицкий Л. В. Испытания дробилки комбинированного действия ДКД-300 на ОФ № 12 Удачнинского ГОКа при отработке руды трубки “Зарница” // Наука и образование. — 2012. — № 2.
5. Львов Е. С., Матвеев А. И., Григорьев Ю. М. Исследование дезинтеграции кимберлитовых руд трубки “Зарница” в дробилке комбинированного действия ДКД-300 // Вестн. СВФУ им. М. К. Аммосова. — 2012. — Т. 9. — № 2.

Поступила в редакцию 21/II 2013