

УДК 622.732

# КОМПЛЕКС САМО- И ПОЛУСАМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ «ЭРДЭНЭТ»: РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**А. В. ГОРЮНОВ**<sup>1</sup>, главный инженер проекта, [rivsproject@rivs.ru](mailto:rivsproject@rivs.ru)  
**А. Н. ИВАНОВ**<sup>2</sup>, директор департамента процессов рудоподготовки  
**Н. О. ТИХОНОВ**<sup>2</sup>, начальник сектора рудоподготовки и методов предконцентрации руд, канд. техн. наук

<sup>1</sup> АО «ГипроРИВС», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> СП ЗАО «ИВС», Санкт-Петербург, Россия

## Введение

Перерабатывая ежегодно более 30 млн т медно-молибденовой руды, предприятие «Эрдэнэт» является одним из крупнейших горно-обогатительных комбинатов в Азии. Рудной базой предприятия служит месторождение Эрдэнэтийн-Овоо, представляющее собой крупный сформированный в гранодиорит-порфирах медно-молибденовый штокерк. Основные породообразующие минералы — полевые шпаты, кварц, серицит. Медная минерализация представлена комплексом различных минералов, среди которых халькозин, ковеллин, борнит, халькопирит, теннантит, куприт, тенорит, азурит, хризоколла и др.; в составе молибденовой минерализации преобладают молибденит и ферримоллибденит. В настоящее время содержание меди в добываемой руде варьируется от 0,5 до 0,6 %, молибдена — от 0,01 до 0,03 %.

На комбинате реализован полный технологический цикл переработки — от добычи руды открытым способом до получения кондиционных медного и молибденового концентратов по флотационной технологии. Последняя разработана специалистами НПО «РИВС» и реализована на базе выпускаемого объединением оборудования, что позволяет стабильно получать высокие технологические показатели вне зависимости от возможных колебаний качества поступающего на обогащение сырья. Подготовка добытой руды к флотации осуществляется дроблением и измельчением до крупности 60–65 % класса –74 мкм на двух технологических линиях, одна из которых сооружена на базе традиционной схемы стадийного дробления, вторая — с применением мельниц само- и полусамои измельчения. Принципиальная схема взаимодействия корпусов рудоподготовительного комплекса представлена на **рис. 1**.

## Комплекс само- и полусамои измельчения до расширения

Комплекс само- и полусамои измельчения (КСИ) включает три параллельно работающие секции: КСИ-1, КСИ-2 и КСИ-3. Секции КСИ-1 и КСИ-2 были введены в эксплуатацию в декабре 1989 г., КСИ-3 — в июле 2015 г. в рамках реализации концепции развития предприятия на 2010–2015 гг. Питание всех секций осуществляется крупнодробленой рудой со склада СКДР-2, представляю-

Дано краткое описание работ по развитию комплекса само- и полусамои измельчения предприятия «Эрдэнэт», выполненных и планируемых к выполнению. Представлены общие сведения о предприятии и действующем на нем рудоподготовительном комплексе, описаны достигнутые показатели работы секций № 1 и 2 корпуса само- и полусамои измельчения, освещены успешные результаты реализации проекта расширения последнего путем строительства третьей секции. Обосновано предложение по дальнейшей интенсификации работы мельничного оборудования в результате внедрения в технологическую линию операции преддробления критического класса крупности.

**Ключевые слова:** предприятие «Эрдэнэт», рудоподготовка, полусамои измельчение, проектирование, строительство, критический класс, додрабывание, предварительное дробление.

**DOI:** [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.01](https://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.01)

щего собой шесть силосов общим объемом около 60 тыс. т. На склад руду подают конвейерами из корпуса крупного дробления ККД-2, в котором параллельно установлены две щековые дробилки ЩДП-15×21 (СМД-117А). Обе дробилки работают в открытом цикле, операции грохочения не предусмотрено.

Секции КСИ-1 и КСИ-2 аналогичны друг другу как по технологической компоновке, так и по аппаратному оформлению. Измельчение осуществляется по двухстадийной схеме SAB [1] без вывода и додрабывания критического класса крупности мельниц I стадии. Крупнодробленую руду со склада СКДР-2 подают в две мельницы мокрого полусамои измельчения ММС 9000×3000А ( $N = 4000$  кВт;  $V = 160$  м<sup>3</sup>), работающие в открытом цикле. Разгрузка ММС 9000×3000А поступает в зумпфы, откуда насосами направляется на II стадию измельчения. II стадия реализуется в шаровых мельницах сливного типа МШЦ 5500×6500 ( $N = 4000$  кВт;  $V = 140$  м<sup>3</sup>), работающих в замкнутых циклах с двухступенчатой предварительно-поверочной классификацией в гидроциклонах NX-660 или ГЦ-1400. На первой ступени классификации имеется возможность подачи части (10–50 %) песков обратно в мельницы I стадии измельчения. Схема цепи аппаратов КСИ-1 и КСИ-2 представлена на **рис. 2**, фактически достигнутые показатели работы за 2014 г. — в **табл. 1**.

## Результаты реализации проекта по расширению комплекса само- и полусамои измельчения путем строительства третьей секции

Установившаяся в последние годы кризисная конъюнктура на мировом рынке цветных металлов обуславливает необходимость

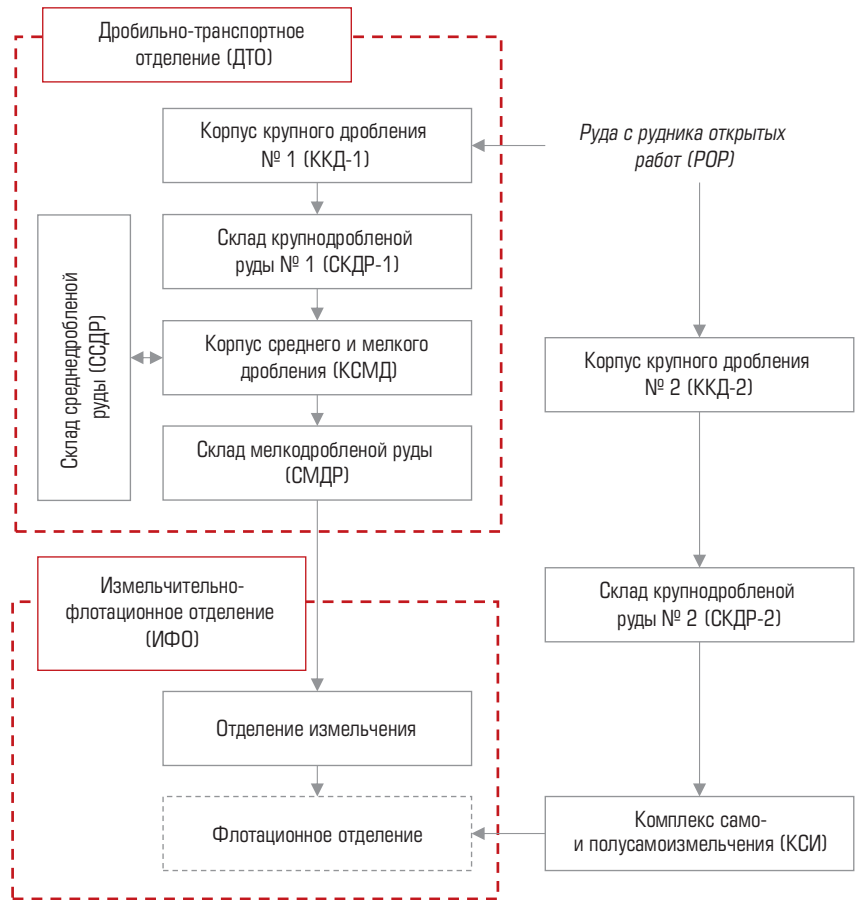
постоянной модернизации действующих горно-обогатительных производств, направленной на снижение себестоимости выпуска готовой продукции и повышение рентабельности отрасли в целом. Одним из наиболее перспективных путей решения указанной задачи является внедрение в технологический процесс высоконадежного крупногабаритного оборудования повышенной единичной мощности. Примером этому, в частности, является успешная реализация проекта по расширению комплекса само- и полусамоизмельчения предприятия «Эрдэнэт».

Решение о начале строительства КСИ-3 проектной мощностью 6 млн т/год было принято Советом руководителей предприятия в июне 2012 г., но из-за сложной экономической ситуации основной объем работ пришелся на 2014–2015 гг. К этому времени в расчете на прием планируемых годовых объемов переработки комбината на уровне 35 млн т в год при участии НПО «РИВС» были подготовлены все нуждающиеся в модернизации переделы: крупное дробление на ККД-2, склад СКДР-2, коллективная флотация, медно-молибденовая селекция, фильтрация и сушка концентратов, хвостовое хозяйство.

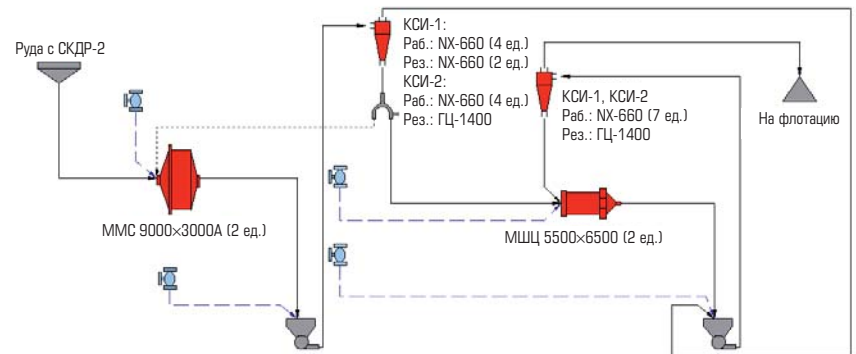
В проектировании, строительстве и вводе в эксплуатацию КСИ-3 приняло участие множество компаний как отечественных, так и зарубежных. Ключевую роль сыграли специалисты предприятия «Эрдэнэт», РИВС, Naipu, CITIC, Минерал Процесс. Схема цепи аппаратов КСИ-3 представлена на **рис. 3**.

Измельчение осуществляется по двухстадийной схеме SABC [1, 2] с додроблением критического класса крупности мельницы I стадии в галечной дробилке. Крупнодробленую руду со склада СКДР-2 подают в мельницу мокрого полусамоизмельчения МПСИ 9750×4880 ( $N = 8400$  кВт;  $V = 363$  м<sup>3</sup>), работающую в замкнутом цикле с грохотом 2400×6000 (2 ед.) и галечной дробилкой Metso HP-400. Подрешетный продукт грохота поступает в зумпф, откуда насосами направляется на II стадию измельчения. Последняя реализуется в шаровой мельнице сливного типа МШЦ 6700×9750 ( $N = 8400$  кВт;  $V = 330$  м<sup>3</sup>), работающей в замкнутом цикле с предварительно-поверочной классификацией в гидроциклонах диаметром 838 мм (7 ед.).

Как отмечалось ранее, ввод КСИ-3 в эксплуатацию был осуществлен в июле 2015 г. **рис. 4**. Высокая квалификация привлеченных специалистов и качественно реализованные технические



**Рис. 1. Схема взаимодействия корпусов рудоподготовительного комплекса обогатительной фабрики предприятия «Эрдэнэт»**



**Рис. 2. Схема цепи аппаратов КСИ-1 и КСИ-2**

решения позволили уже в августе вывести передел на проектные показатели по производительности и крупности готового продукта. Проект расширения комплекса само- и полусамоизмельчения предприятия «Эрдэнэт» явился одним из наиболее значимых шагов развития горнодобывающей промышленности в Восточной Азии за последние годы.

Таблица 1. Показатели работы секций КСИ-1 и КСИ-2 в 2014 г.

Параметр	На одну секцию	На обе секции
Объем переработки, т/год	2657000	5314000
Средняя производительность, т/ч	355	710
Коэффициент использования оборудования, %	85,4	
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	19,4	

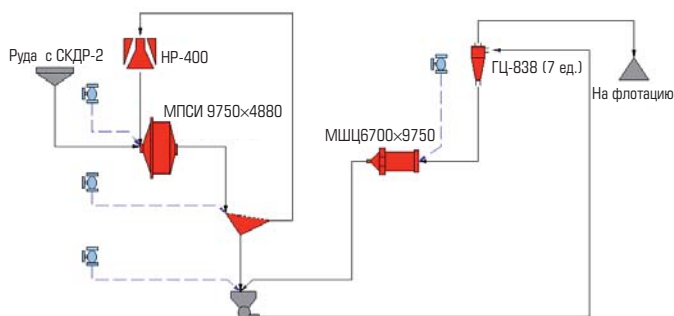


Рис. 3. Схема цепи аппаратов КСИ-3

### Перспективы дальнейшей интенсификации работы комплекса

В целях повышения рентабельности и технологической эффективности работы КСИ НПО «РИВС» предлагает ряд решений по организации предварительного дробления критического класса крупности в питании мельниц I стадии измельчения. Традиционно к критическому классу относят частицы, крупность которых слишком мала для обеспечения эффективного разрушения более мелких частиц и слишком велика для их собственного разрушения более крупными частицами. Опыт показывает, что для современных мельниц само- и полусамоизмельчения критическими

могут являться частицы класса крупности 70+20 мм, характеризующиеся пониженными темпами разрушения.

Пониженные темпы разрушения частиц критической крупности обуславливают их накопление в рабочем пространстве барабана мельницы, что негативно сказывается на пропускной способности и удельном расходе энергии. Особенно ярко это проявляется при переработке руд высокой твердости, к которым, в частности, относятся и руды месторождения Эрдэнэтийн-Овоо со средними прочностными свойствами:  $BWi = 17,6$  кВт·ч/т;  $DWi = 6,6$  кВт·ч/м<sup>3</sup>;  $Ab = 42,7$ ;  $ta = 0,44$  [3–5] и удельным расходом энергии на полусамоизмельчение около 9,7 кВт·ч/т. Для перевода частиц критического класса крупности 70+20 мм в более легкоизмельчаемый класс крупности –20 мм рекомендуется схема преддробления, включающая следующие основные решения:

- организацию грохочения крупнодробленой руды ККД-2 по классам 70 и 20 мм с непосредственной подачей материала крупностью 70 и 20 мм на СКДР-2;
- вывод частиц критического класса крупности 70+20 мм на дробление до 20 мм с последующей подачей на СКДР-2.

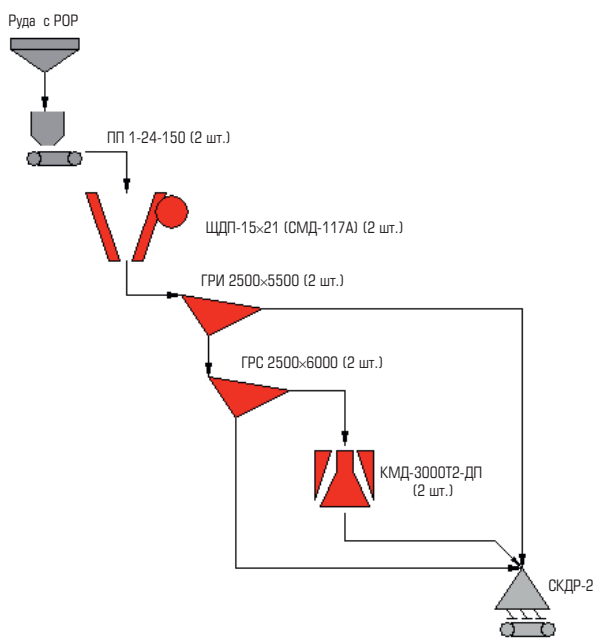
Рекомендуемая схема предварительного дробления представлена на рис. 5.

Сравнительные гранулометрические характеристики крупнодробленой руды и продукта корпуса предварительного дробления представлены на рис. 6.

Организация операции предварительного дробления критического класса крупности в питании мельниц само- и полусамоизмельчения позволяет значительно снизить как его содержание во внутримельничной загрузке, так и общий уровень заполнения мельницы материалом. Последнее обуславливает возможность повышения производительности мельницы при одновременном снижении удельных энергетических затрат на измельчение [4–7]. Для прогнозирования возможного увеличения производительности КСИ при переходе с крупнодробленой руды на продукт



Рис. 4. Секция КСИ-3 перед вводом в эксплуатацию



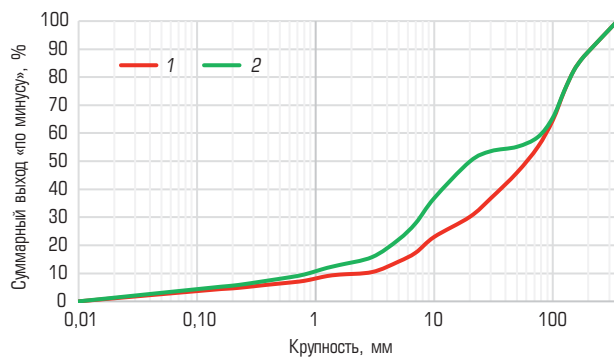
**Рис. 5. Схема цепи аппаратов корпуса преддробления критического класса крупности производительностью 15 млн т в год**

корпуса предварительного дробления была выполнена серия моделирующих расчетов с применением специализированных компьютерных программ [8–16]. При этом были приняты следующие сдерживающие рост производительности факторы:

- содержание класса –74 мкм в питании флотации не менее 65 %;
- 80%-ная крупность питания флотация не более  $P_{80} = 120$  мкм;
- содержание твердого в питании флотации не менее 30 %;
- общее заполнение мельниц I стадии материалом не превышает фактического;
- заполнение мельниц шарами не превышает фактического;
- циркуляция во II стадии измельчения не превышает 250 %.

Результаты моделирования показали возможность увеличения общей годовой производительности КСИ более чем на 2 млн т в год при сохранении фактических КИО. Прогнозируемые показатели работы комплекса представлены в **табл. 2** в сравнении с фактическими.

Представленные данные свидетельствуют о высокой эффективности предлагаемых решений по организации предварительного дробления критического класса крупности в питании КСИ как в плане повышения производительности и объемов выпуска товарной продукции, так и в отношении снижения себестоимости переработки руды и увеличения рентабельности предприятия в целом.



**Рис. 6. Сравнительные гранулометрические характеристики питания КСИ до и после операций предварительного дробления:**

1 — крупнодробленая руда; 2 — продукт предварительного дробления

**Таблица 2. Ожидаемые показатели работы комплекса само- и полусамозмельчения предприятия «Эрдэнэт» после внедрения операции преддробления**

Параметр	Существующая схема	После внедрения предварительного дробления	Прирост (+)/снижение (–), %
Объемы переработки, млн т/год	11,31	13,31	+17,7
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	19,89	16,72	–15,9
Удельный расход шаров, кг/т	1,16	0,96	–17,3
Удельный расход футеровки, кг/т	0,14	0,13	–8,9

### Выводы

Совместная работа специалистов предприятия «Эрдэнэт», ведущих инжиниринговых компаний и поставщиков оборудования в лице НПО «РИВС», Nairi, CITIC и др. позволила в кратчайшие сроки успешно реализовать сложный технический проект по расширению рудоподготовительного комплекса предприятия с доведением общей годовой производительности до 32 млн т. В условиях складывающихся тенденций снижения рыночных цен на цветные металлы и прогнозируемого повышения крепости добываемой руды чрезвычайно перспективным представляется продолжение работ, направленных на совершенствование рудоподготовительной технологии путем организации предварительного дробления критического класса крупности в питании мельниц само- и полусамозмельчения с последующим доведением общей годовой производительности до 34 млн т.

**Библиографический список**

1. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T. Mineral comminution circuits: their operation and optimization. Australia, Brisbane, JKMRС, 2005. Chapter 4.
2. Comminution handbook / Ed. by A. Lynch. — The Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2015. — 324 p.
3. Тихонов Н. О., Скарин О. И. Расчет мельниц полусамоизмельчения по энергетическим индексам // Горный журнал. 2014. № 11. С. 6–10.
4. Тихонов Н. О., Господариков А. П. Учет динамики движения внутримельничной загрузки при расчете развиваемой мощности барабанных мельниц // Горный журнал. 2014. № 11. С. 11–17.
5. Скарин О. И., Арустамян К. М. Современные методы оценки измельчаемости руд в циклах полусамоизмельчения // Горный журнал. 2012. № 11. С. 6–10.
6. JKTech Laboratory Service Bond Rod Mill Index Test (BBMWI). JKTech SMI Technology Transfer : [website]. URL: [http://jktech.com.au/sites/default/files/brochures/LabServices\\_BondRodMill.pdf](http://jktech.com.au/sites/default/files/brochures/LabServices_BondRodMill.pdf) (дата обращения: 30.09.2016).
7. Газалеева Г. И., Братыгин Е. В., Курков А. В., Рогожин А. А. Критерии выбора оптимальных схем рудоподготовки // Обогащение руд. 2015. № 6. С. 3–8.
8. Таранов В. А., Баранов В. Ф., Александрова Т. Н. Обзор программ по моделированию и

- расчету технологических схем рудоподготовки // Обогащение руд. 2013. № 5. С. 3–7.
9. Kojovic T., Napier-Munn T. J., Andersen J. S. Modelling Cone and Impact Crushers Using Laboratory Determined Energy-Breakage Functions // SME Publications. 1998.
10. Awachie S. F. A. Development of crushing models using laboratory breakage data. University of Queensland. Ph.D. Thesis, 1983.
11. Morrell S., Morrison R. AG and SAG mill circuit selection and design by simulation // Proc. SAG. Vancouver, 1996. P. 769–790.
12. Leung K. An energy based ore specific model for autogenous and semi- autogenous grinding. University of Queensland. Ph.D. Thesis. 1987.
13. Doll A. Technical Memorandum: JK ball mill model notes. Consulting Ltd. Vancouver, 2007. — 4 p.
14. Kavetsky A., Whiten W. J. Scale up relations for industrial ball mills // Proceedings AusIMM. 1982. No. 282. P. 47–55.
15. Narasimha M., Mainza A. N., Holtham P. N., Powell M. S., Brennan M. S. A semi-mechanistic model of hydrocyclones. — Developed from industrial data and inputs from CFD // International Journal of Mineral Processing. 2014. No. 133. P. 1–12.
16. Morrell S. Using the SMC Test to predict comminution circuit performance. URL: [http://www.smctesting.com/documents/Using\\_the\\_SMC\\_Test.pdf](http://www.smctesting.com/documents/Using_the_SMC_Test.pdf) (дата обращения: 30.09.2016). **ПЖ**

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 11, pp. 4–8  
 DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.01](http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.01)

**Erdenet auto-/semiauto-grinding system: Effect and prospects**

**Information about authors**

**A. V. Goryunov**<sup>1</sup>, Chief Project Engineer, [rivsproject@rivs.ru](mailto:rivsproject@rivs.ru)  
**A. N. Ivanov**<sup>2</sup>, Director of Ore Pretreatment Department  
**N. O. Tikhonov**<sup>2</sup>, Head of Ore Pretreatment and Preconcentration Sector, Candidate of Engineering Sciences  
<sup>1</sup> GiproRIVS, Saint-Petersburg, Russia  
<sup>2</sup> IVS Joint Venture, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract**

The crisis business climate recently settled on the world market of nonferrous metals calls for continuous modernization of operating mining and processing plants to reduce production cost and raise profitability of the extraction and beneficiation industries. One of the most promising ways of reaching the objective is introduction of extremely reliable heavy-duty equipment of increased capacity. An illustration of successful accomplishment of the objective is the project on expansion of auto-/semiauto-grinding system at Erdenet Mining Corporation.

The auto-/semiauto-grinding system (ASGS) was introduced into service in July 2015. Highly qualified personnel and sound implementation of engineering decisions enabled this process stage to reach the design production output and final product size in the short term. The auto-/semiauto-grinding system expansion project of Erdenet turned out to be one of the most significant steps of advancement in the mining industry of East Asia of late years.

The two-stage SABС grinding circuit includes additional grinding of critical size grade of milling stage I in a pebble mill. After primary crushing, ore from SMDR-2 storage is fed to wet semiauto-grinding by mill MPSI 9750×4880 ( $N = 8400$  kW;  $V = 363$  m<sup>3</sup>) closely looped with 2 screeners 2400×6000 and pebble mill Metso HP 400. The screen underflow goes to a sump and is pumped out from there to milling stage II. Milling stage II uses overflow-type ball mill MShTs 6700×9750 ( $N = 8400$  kW;  $V = 330$  m<sup>3</sup>) closely looped with 7 cyclones with a diameter of 838 mm for preliminary test classing.

Planning, construction and commissioning of ASGS was contributed to by many domestic and foreign companies. Joint operation of Erdenet and the leading engineering companies and equipment supplies represented by RIVS, Naipu, CITIC and others enabled short-term and successful implementation of the complex project on expansion of ore pretreatment and on bringing annual production output of the processing circuit on to 32 Mt. Facing the trend of downward market prices of nonferrous metals and the forecasted increase hardness of produced ore, it is crucially promising to continue improvement of ore pretreatment technology by means of preliminary auto-/semiauto-grinding of critical size grade and reaching of annual production output of 34 Mt.

**Keywords:** Erdenet Mining Company, ore pretreatment, semiauto-grinding, design, construction, critical size, additional grinding, preliminary grinding.

**References**

1. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T. Mineral comminution circuits: their operation and optimization. Australia, Brisbane, JKMRС, 2005. Chapter 4.
2. Comminution handbook. Ed. by A. Lynch. The Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2015. 324 p.
3. Tikhonov H. O., Skarin O. I. Semiautogenous grinding mills' capacity calculation by energy indices. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 11. pp. 6–10.
4. Tikhonov N. O., Gospodarikov A. P. Accounting of dynamics of inter-mill charging movement in the time of calculation of power output of tumbling mills. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 11. pp. 11–17.
5. Skarin O. I., Arustamyan K. M. Modern estimation methods of ores crushability in the semi self crushing cycles. *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 11. pp. 6–10.
6. JKTech Laboratory Service Bond Rod Mill Index Test (BBMWI). JKTech SMI Technology Transfer. Available at: [http://jktech.com.au/sites/default/files/brochures/LabServices\\_BondRodMill.pdf](http://jktech.com.au/sites/default/files/brochures/LabServices_BondRodMill.pdf) (accessed: 30.09.2016).
7. Gazaleeva G. I., Bratygin E. B., Kurkov A. B., Rogozhin A. A. The criteria for choosing optimum ore preparation flow sheets. *Obogashchenie Rud*. 2015. No. 6. pp. 3–8.
8. Taranov V. A., Baranov V. F., Aleksandrova T. N. Review of software tools for modeling and calculation of ore preparation flowsheets. *Obogashchenie Rud*. 2013. No. 5. pp. 3–7.
9. Kojovic T., Napier-Munn T. J., Andersen J. S. Modelling Cone and Impact Crushers Using Laboratory Determined Energy-Breakage Functions. *SME Publications*. 1998.
10. Awachie S. F. A. Development of crushing models using laboratory breakage data. Ph.D. Thesis. University of Queensland, 1983.
11. Morrell S., Morrison R. AG and SAG mill circuit selection and design by simulation. *Proc. SAG Vancouver*, 1996. pp. 769–790.
12. Leung K. An energy based ore specific model for autogenous and semi- autogenous grinding. Ph.D. Thesis. University of Queensland, 1987.
13. Doll A. Technical Memorandum: JK ball mill model notes. Consulting Ltd. Vancouver, 2007. 4 p.
14. Kavetsky A., Whiten W. J. Scale up relations for industrial ball mills. *Proceedings AusIMM*. 1982. No. 282. pp. 47–55.
15. Narasimha M., Mainza A. N., Holtham P. N., Powell M. S., Brennan M. S. A semi-mechanistic model of hydrocyclones — Developed from industrial data and inputs from CFD. *International Journal of Mineral Processing*. 2014. No. 133. pp. 1–12.
16. Morrell S. Using the SMC Test to predict comminution circuit performance. Available at: [http://www.smctesting.com/documents/Using\\_the\\_SMC\\_Test.pdf](http://www.smctesting.com/documents/Using_the_SMC_Test.pdf) (accessed: 30.09.2016).