

На правах рукописи



ФЕДОТОВ ПАВЕЛ КОНСТАНТИНОВИЧ

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ РУДЫ
В СЛОЕ ЧАСТИЦ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Специальность 25.00.13 - Обогащение полезных ископаемых

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Иркутск - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет»

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор кафедры НИ ИрГТУ
Байбородин Борис Алексеевич.

Официальные оппоненты: Бочаров Владимир Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
НИТУ МИСиС, кафедра
«Обогащения руд цветных и редких металлов»,
профессор;
Маляров Петр Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
Южно-Российский государственный политехнический
университет, кафедра «Горные машины», профессор;
Юсупов Талгат Сунгатуллович,
доктор технических наук, профессор,
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
СО РАН, лаборатория изотопно-аналитических
методов, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: ЗАО «Механобр инжиниринг», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «02» июня 2015 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.01. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, д.4, +7(495)360-8960, ipkon-dir@ipkonran.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН (http://www.ipkonran.ru/diss_news.php).

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

В.И. Папичев

Актуальность работы.

Дезинтеграция минерального сырья с целью извлечения ценных компонентов является весьма сложным и энергоемким физическим процессом. От его оптимизации зависит рентабельность переработки полезного ископаемого в целом.

Большинство руд, добываемых в настоящее время в мире, имеют мелкозернистую структуру и требуют более тонкого измельчения, чем традиционное. Прямым следствием этого обстоятельства является необходимость решения проблемы применения промышленных технологий, позволяющих реализовать оптимальное соотношение производительности процесса рудоподготовки, его энергоемкости и гранулометрического состава руды, подаваемой на обогащение.

Результаты исследований, проводимых в области дезинтеграции руды, посвящены, прежде всего, изучению механизма разрушения кристаллических образований. Они позволяют наметить пути рациональной организации процесса селективного и менее энергоёмкого раскрытия минеральных сростков, базирующегося на развитии ряда гипотез, в частности гипотезы о дислокационном зарождении микротрещин Гриффитса-Орована-Ребиндера и ряда других. Используя эти гипотезы, а так же новые экспериментальные и теоретические данные можно утверждать, что технология рационального разрушения руды состоит из двух этапов, а именно: первый – подготовка руды к раскрытию (разупрочнение), второй – само её раскрытие (диспергирование).

Изучению проблем повышения производительности и ресурсосбережения различных технологий переработки руды, используемых на стадиях её дробления и измельчения, посвящены работы И.Н. Артобольского, Л.И.Барона, Д.П.Беренова, И.И.Блехмана, Л.А.Вайсберга, Г.В.Гапонова, С.А.Гончарова, Л.П.Зарогатского, И.М.Костина, В.Р.Кубачека, Л.Б. Левенсона, О.П. Малюка, Ю.Н.Панкратова, В.Н.Патураева, А.А.Першукова, В.А.Петрова, В.И. Ревнивцева, А.Н.Ставрогина, К.В.Уралохва, Г.А.Финкельштейна, К.В.Фролова, Э.А.Хопунова, В.А.Чантурия, В.П. Яшина и др.

Одним из современных способов рудоподготовки является разрушение частиц руды в слое под давлением в валковых мельницах высокого давления (роллер-прессах (РП)), который позволяет, одновременно реализовать несколько стадий дробления и измельчения руды в одном аппарате и значительно снизить затраты энергии на её разрушение. В его основе реализован способ объемного разрушения руды, позволяющий при определенном подборе силового воздействия на рудную массу значительно уменьшить удельные затраты энергии разрушения. Кроме этого управление параметрами процесса дезинтеграции в данной технологии позволит увеличить извлечение из руды ценных компонентов за счёт снижения ее переизмельчения.

Данная технология применяется в горно-обогатительной промышленности более десяти лет. Основной проблемой, препятствующей эффективной её реализации, является недостаточная изученность механизмов её протекания.

В настоящее время отсутствует практическая возможность изучения подобных быстро протекающих массовых процессов дезинтеграции кусков. Динамика, кинематика, полнота физической картины и механизма дробления и измельчения массы кусков руды в объёме практически не может быть описана в реальном масштабе времени. Отсутствуют теоретические методики, позволяющие с высокой точностью и достоверностью управлять процессом от проведения лабораторных исследований и подбора аппаратов, до управления параметрами процесса непосредственно при рудоподготовки на обогатительной фабрике. Существующие теории дробления носят эмпирический характер и применимы только при определенных условиях разрушения на конкретных рудах и материалах. Оптимальная дезинтеграция руды достигается тогда, когда разрушаемому материалу сообщается необходимый и достаточный уровень внешнего усилия и, соответственно, энергии деформации разрушения.

Выход из данной ситуации возможен на основе решения комплексной задачи, где, с одной стороны, используется накопленный к настоящему времени опыт экспериментальной работы, позволивший выявить устойчивые эмпирические зависимости процесса разрушения руд от величины работы внешних сил. С другой стороны, для определения энергии разрушения, используется теоретическое решение, построенное на основе современных компьютерных технологий инженерного анализа. Эти технологии базируются на матричных математических методах численного решения. В частности на наиболее эффективном из них - методе конечных элементов (МКЭ), используемом для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) руды и, соответственно, потенциальной энергии её деформации. Для изучения механизма дезинтеграции руды в слое частиц под давлением реализация МКЭ необходима с решением контактной задачи теории упругости.

Таким образом, развитие современных эмпирических теорий дробления, построенных на энергетическом принципе и используемых в совокупности с применением современного математического моделирования на основе МКЭ, с апробацией данного подхода для управления параметрами процесса разрушения руды в слое частиц под давлением, является актуальной задачей, имеющей важное промышленное значение.

Идея работы.

Определение основных технологических параметров процесса дезинтеграции руды в слое частиц под давлением на основе моделирования напряженно-деформированного состояния кусков рудной массы с применением теории дробления Бонда без проведения натурных экспериментов.

Цель работы.

Управление технологическими параметрами процесса дезинтеграции руды в слое частиц под давлением с помощью разработанной математической модели на основе метода конечных элементов, контактной задачи механики твердого деформируемого тела и теории дробления.

Задачи исследования.

Изучение и развитие фундаментальных аспектов теории дробления руд, построенных на энергетическом принципе зависимости крупности продукта дробления от работы внешних сил, применительно к процессу разрушения частиц в слое валковых мельниц под давлением.

Разработка и алгоритмизация математической модели на основе метода конечных элементов (МКЭ) с реализацией контактной задачи теории упругости, предназначенной для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и плотности потенциальной энергии деформации каждого из кусков горной породы в слое между валками роллер-пресса, в процессе внешнего силового воздействия на них.

Определение достоверности применяемого анализа объемного напряженно-деформированного и энергетического состояния кусков породы в слое частиц под давлением, проводимое, как на основе точности, сходимости численного решения МКЭ и контактной задачи на образцах породы, так и на основе экспериментальных данных.

Построение конечно-элементной (КЭ) модели реального объекта в виде слоя руды и валков роллер-пресса, включающей: формирование геометрии модели; генерацию КЭ сетки деформируемых тел и контактных конечных элементов между ними; установление граничных условий кинематического закрепления; учет действия внешней нагрузки; свойства материалов породы, учет масштабного фактора.

Всестороннее изучение механизма дезинтеграции минеральных частиц в слое под давлением на основе анализа НДС и энергетического состояния МКЭ модели слоя породы под давлением.

Установление количественных зависимостей между режимными и технологическими параметрами валковых мельниц высокого давления с целью оптимизации процесса дезинтеграции руды, а также разработка методики регулирования уровня разрушающего воздействия и гранулометрической характеристики выхода породы в зависимости от параметров процесса и материала.

Разработка научно-практических основ методологии оптимизации и управления процессом объёмного разрушения руды на основе полученной картины напряженно-деформированного и энергетического состояния разрушения руд в слое частиц между валками

Научная новизна.

1. Впервые разработана математическая модель на основе метода конечных элементов с применением контактной задачи теории упругости, позволяющая получить качественную и количественную картину НДС и величину потенциальной энергии деформирования горной породы в слое частиц под давлением, подтверждаемая данными натурных экспериментов.

2. Впервые в определении НДС и величины потенциальной энергии деформации кусков породы в слое частиц под давлением использован масштабный фактор, определяемый через изменение модуля упругости материала. Зависимость получена на основе диаграмм деформирования образцов горных пород в виде прямой пропорциональной зависимости вплоть до разрушения, а также эмпирической зависимости Л.И Барона.

3. Выявлен механизм разрушения руды в слое частиц под давлением в валковых мельницах высокого давления. Установлено, что высокий уровень производительности и уменьшение энергоемкости при объёмном разрушении руды в слое обусловлены возникновением градиента нормальных напряжений при контактном взаимодействии частиц минерального сырья.

4. Разработана методология оценки технологических параметров дезинтеграции руды на основе теории и практики процесса рудоподготовки с целью его оптимизации.

Методика исследования.

В теоретических исследованиях использованы основные положения механики твердого деформированного тела, с применением метода конечных элементов (МКЭ) и принципа минимизации функционала потенциальной энергии рассматриваемой деформируемой системы. Использован полный набор математического аппарата теории матриц, алгебраической сплайн аппроксимации и численного интегрирования. Контактная задача определения напряженно-деформированного состояния взаимодействия объемов породы, решается с использованием модифицированного подхода в методе перемещений теории упругости. Моделирование условий контактного взаимодействия между объемами породы осуществляется посредством решения вариационного неравенства с использованием метода штрафных функций. При моделировании силового воздействия в процессе работы роллер-пресса использовался принцип Даламбера. Решение глобальной системы алгебраических уравнений осуществляется прямым методом исключения Гаусса, на основе алгоритма Холецкого и метода вложенных сечений для работы с разреженными матрицами. Для определения выхода породы в виде гранулометрической характеристики использовалась эмпирическая зависимость Бонда.

Для разработки программного модуля, реализующего представленный выше анализ, использовался алгоритмический язык Fortran. На основе этого модуля проводилось тестирование численных решений МКЭ представленной физической задачи. Построение геометрической модели кусков руды осуществлялось в графическом редакторе AutoCAD. Подготовка геометрии слоя породы в целом осуществлялась математическим моделированием на основе решения уравнения динамики движения, с применением программного комплекса MSC.Adams. Создание конечно-элементных (КЭ) моделей объекта исследования (сетка дискретной модели, внешнее силовое воздействие, граничные условия, параметры контактного взаимодействия и другие), а также их визуализация и обработка результатов анализа проводились с использованием программного комплекса Msc.Patran. Анализ реального объекта моделирования проводился в программном комплексе Msc.Marc.

При обработке результатов натурных экспериментов применялись методы математической статистики. Эксперименты проводились на промышленных сертифицированных аппаратах с соблюдением технологических параметров оборудования действующих обогатительных фабрик и установок.

Достоверность научных положений подтверждается достаточной базой исследований точности и сходимости численных и других теоретических решений. Лабораторные и опытно-промышленные исследования проводились с сопровождением современной методологии обработки статистической информации и планированием эксперимента.

Практическая реализация результатов работы.

Разработанная математическая модель напряженного состояния образцов слоя породы между прокатными валками под давлением позволяет с высокой эффективностью управлять процессом дезинтеграции руды в роллер-прессе, подбирая основные параметры работы аппарата в зависимости от теоретически полученной гранулометрической характеристики дробленого продукта.

В промышленном масштабе внедрен и оптимизирован процесс объёмного разрушения руды в слое частиц под давлением на трех горно-обогатительных комбинатах России (ГОК Западный) и республики Казахстан (ГОК Нурказган, ГОК Васильковский).

Техническая новизна конструкторских и технологических работ защищена 1 патентом РФ на изобретение.

Апробация работы.

Основные результаты и научные положения работы докладывались: на XXIV Международном конгрессе обогатителей (IMPC, Пекин, Китай, 2008 г); на VII Конгрессе обогатителей стран СНГ, (Москва, Россия, МИСИС, 2011 г.); на на-

учно-практической конференции «Плаксинские чтения - 2012» (Петрозаводск, Россия, 2012г.), на XXVI Международном конгрессе обогатителей (IMPC, Дели, Индия, 2012 г.); 10-й Международной научной школе молодых ученых и специалистов ИПКОН РАН (Москва, Россия, 2013 г.); на научно-практической конференции «Плаксинские чтения - 2013» (Томск, Россия, 2013г.); на научно-практической конференции «Неделя горняка - 2014» (Москва, Россия, МГГУ, 2014г.); на конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (УГГУ, Екатеринбург, Россия, 2014 г.).

Полностью диссертационная работа была доложена в Иркутском государственном техническом университете (кафедра обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии), Уральском государственном горном университете (кафедра обогащения полезных ископаемых), Московском институте стали и сплавов (Горном университете, кафедра обогащения полезных ископаемых), Санкт-Петербургском государственном горном университете (кафедра обогащения полезных ископаемых).

Личный вклад автора.

Автором произведена постановка цели и основных задач исследований и выполненных работ.

Проанализированы теории дробления руд, проведён анализ основных способов разрушения руд, представлены различные классификации аппаратов для разрушения.

Создана математическая модель анализа НДС руды в слое частиц под давлением с использованием метода конечных элементов и контактной задачи теории упругости.

Разработана методика проведения экспериментов дробления руды в роллер-прессе. Проведены полупромышленные и лабораторные исследования разрушения руд в слое частиц.

Разработана методология определения основных технологических параметров процесса дезинтеграции в слое частиц руды под давлением с использованием математического моделирования и эмпирических теорий дробления.

Разработана методика определения оптимальных режимов работы роллер-пресса.

Проведена проверка разработанных технологических схем и регламентов в опытно-промышленных условиях.

Публикации. По результатам выполненных исследований автор имеет 40 печатных работ, в том числе две монографии, патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 301 страницах машинописного текста, содержит 137 рисунков и 32 таблиц.

Защищаемые положения:

1. Математическая модель на основе метода конечных элементов, включающая решение контактной задачи теории упругости, позволяет с высокой точностью определять потенциальную энергию деформирования кусков руды в слое, с целью определения параметров дезинтеграции.

Представления о прочности тела в виде куска руды логично построить на основе энергетического критерия разрушения А.А. Гриффитса, согласно которому трещина начинает распространяться в хрупком теле, если скорость освобождения энергии упругой деформации в процессе ее распространения будет больше прироста поверхностной энергии.

Однако, учитывая стохастический характер расположения трещин в кусках горной породы, а также включений, дислокаций и других неравномерностей, модель А.А. Гриффитса, позже доработанная Г. Р. Ирвином, не содержит математических соотношений для определения размеров тела при разрушении, когда это уравнение правомерно и, таким образом, не имеет на сегодняшний день решения.

На практике используются так называемые критерии разрушения (прочности), по которым и определяется момент разрушения руды в процессе внешнего воздействия на неё. Их изучение предполагает экспериментальное определение таких характеристик прочности материала пород, как модуль упругости, предел прочности и других. Исследование проводится путем одноосного сжатия образцов правильной формы. Полученные характеристики усредняются в зависимости от размеров образцов. Представленный подход имеет важное практическое значение, однако его недостаточно для оценки механизма взаимодействия кусков руды в условиях слоя под давлением. В этом случае показатели их деформации и, соответственно, прочности, при прочих равных условиях, определяются некоторым сложным НДС, с высоким градиентом изменения.

Изучение механизма дезинтеграции руд в настоящей работе предлагается проводить на основе решения комплексной задачи, где с применением математического моделирования определяются НДС и энергия деформации слоя породы под давлением, с дальнейшим использованием этих результатов в эмпирических зависимостях, определяющих параметры разрушения минерального сырья.

Математическое моделирование проводится с применением современных компьютерных технологий инженерного анализа, построенных на основе матричных математических методов численного решения и, в частности, одним из высокоэффективных - методе конечных элементов (МКЭ). Его использование для определения НДС руды и потенциальной энергии её деформации в процессе воздействия внешних сил позволит получить качественную и количественную картину исследуемого механизма дезинтеграции, где, для изучения сил взаимодействия кусков породы, используется контактная задача теории упругости.

Математическое моделирование МКЭ в задачах механики твердого деформируемого тела проводится на основе вариационно-энергетического принципа метода перемещений теории упругости, построенного с позиции баланса энергетических величин процесса дробления: работы внешнего силового воздействия и внутренней потенциальной энергии деформации руды. Таким образом, общее энергетическое соотношение рассматриваемой деформируемой системы характеризуется известным выражением вида:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{\delta\}} = \frac{\partial (\Lambda - W)}{\partial \{\delta\}} = 0 \quad (1)$$

где: Λ – внутренняя энергия сил сопротивления деформируемого тела, W – работа внешних сил, Π – полная потенциальная энергия деформируемой механической системы. С учетом условия ограниченности рассматриваемых величин в области их определения, вариационно-энергетический принцип виртуальных перемещений утверждает, что сумма изменений потенциальной энергии внешних нагрузок δW и величины внутренней энергии деформации $\delta \Lambda$, при некотором (виртуальном, определяемом) поле упругих перемещений $\{\delta\}$, равна нулю.

Функционал потенциальной энергии деформируемой системы в виде среды горных пород, определяемый для дискретной области определения, имеет вид:

$$\Pi = \sum_{e=1}^E (\Lambda^{(e)} - W^{(e)}) = \sum_{e=1}^E \Pi^{(e)}, \quad (2)$$

где: E – число конечных элементов (КЭ) дискретной области определения; $\Pi^{(e)}$ – доля потенциальной энергии отдельного конечного элемента.

Выражение для определения внутренней потенциальной энергии деформации на КЭ имеет вид:

$$\Lambda^{(e)} = \int_{V^e} \frac{1}{2} \left(\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} \right) dv, \quad (3)$$

где: численное интегрирование ведется по объему КЭ - V^e в декартовой системе координат o, x, y, z . Раскрывая скобки и подставляя значения выражений для векторов-столбцов $\{\sigma\}$ и $\{\varepsilon\}$, получим:

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(e)}} \{\delta\}^{(e)T} [B]^T [D] [B] \{\delta\}^{(e)} dV, \quad (4)$$

где $\{\delta\}^{(e)}$ - вектор-столбец значений упругих перемещений в узлах КЭ; $[B]$ - матрица дифференцирования; $[D]$ - матрица упругости материала горных пород. Выражения для матриц $[B]$ и $[D]$ приведены ниже, при описании КЭ, предназначенных для моделирования объемов (кусков) горных пород.

Работа внешних сил, совершаемая над породой, может быть условно разделена на три вида: W_p - работа сосредоточенных (контактных) сил; $W_q^{(e)}$ - работа

распределенной на поверхности нагрузки; $W_g^{(e)}$ - работа объемных (массовых) сил.

Выражения для W_p и $W_g^{(e)}$ в МКЭ определяются в виде:

$$W_p = \{\delta\}^T \{P\} = \{P\}^T \{\delta\}; \quad W_g^{(e)} = \int_{V^e} \{\delta\}^T [N] \{g\} dv \quad (5)$$

где: $\{\delta\}$ и $\{P\}$ - векторы-столбцы узловых перемещений и сил в направлении осей x, y, z ; $[N]$ - функции формы КЭ, используемые для аппроксимации величин и построенные относительно его узлов с применением алгебраических полиномов (представлены ниже); $\{g\}$ - вектор-столбец объемных массовых сил; V^e - объем КЭ. Выражение для работы внешних поверхностных сил имеет вид:

$$W_q^{(e)} = \int_{S^e} \{\delta\}^T [N] \{q\} dS, \quad (6)$$

где $\{q\}$ - вектор-столбец распределенной внешней нагрузки в направлении осей x, y, z , а численное интегрирование проводится по площади - S^e , области определения этой нагрузки на конечном элементе.

Подстановка выражений (4), (5), (6) в выражение (2) дает:

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \left[\int_{V^e} \frac{1}{2} \{\delta\}^T [B]^T [D] [B] \{\delta\} dv - \int_{V^e} \{\delta\}^T [N]^T \{g\} dv - \int_{S^e} \{\delta\}^T [N]^T \{q\} dS \right] - \{\delta\}^T \{P\}. \quad (7)$$

Реализуя принцип стационарности Π по перемещению $\{\delta\}$, имеем:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{\delta\}} = \sum_{e=1}^E \left[\int_{V^e} [B]^T [D] [B] \{\delta\} dv - \int_{V^e} [N]^T \{g\} dv - \int_{S^e} [N]^T \{q\} dS \right] - \{P\} = 0 \quad (8)$$

Первый интеграл под знаком суммы в выражении (8) определяет собой матрицу жесткости КЭ - $[k^e]$, определяемую относительно вектора-столбца $\{\delta\}$, остальные интегралы входят в состав вектора-столбца эквивалентных узловых сил на элементе. Выражения для $[k^e]$ и $\{F^e\}$ имеют вид:

$$[k^e] = \int_{V^e} [B]^T [D] [B] dv; \quad \{F^e\} = - \int_{V^e} [N]^T \{g\} dv - \int_{S^e} [N]^T \{q\} dS - \{P\}. \quad (9)$$

Таким образом, глобальная матрица жесткости $[K]$ и вектор-столбец сил $\{F\}$ рассматриваемой деформируемой системы определяются в виде сумм:

$$[K] = \sum_{e=1}^E [k^e], \quad \{F\} = \sum_{e=1}^E \{F^e\}, \quad (10)$$

которые являются величинами известными и позволяют преобразовать выражение (8) к уравнению равновесия механической системы в виде глобальной системы алгебраических уравнений в матричном виде:

$$[K] \{\delta\} = \{F\}. \quad (11)$$

Построение глобальной матрицы жесткости $[K]$ суммированием из матриц жесткости отдельных КЭ осуществляется с использованием топологической информации, представляющей собой некоторый порядок обхода номеров узлов КЭ,

полученный из глобальной нумерации узлов в КЭ модели объекта. Формирование вектора-столбца $\{F\}$ осуществляется подобным образом, однако поэлементное суммирование ведется здесь только для объемных нагрузок. Учет сил, приложенных к внешней поверхности, осуществляется по топологии тех областей КЭ модели, где они определены.

Для расчёта НДС твердых деформируемых тел сложной геометрической формы используется тип конечного элемента - изопараметрический гексаэдр (рис. 1) первого порядка в декартовой системе координат.

Вектор упругих перемещений на КЭ определяется выражением вида:

$$\{\delta\}^e = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N] \{\delta\} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \dots \\ u_8 \\ v_8 \\ w_8 \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

где $[N]$ - его функций формы. Их построение осуществляется с использованием местной системы нормализованных координат (рис. 1): $-1 \leq \xi \leq 1$; $-1 \leq \eta \leq 1$; $-1 \leq \zeta \leq 1$ и, для восьми узлового гексаэдра, построены с применением полинома первого порядка. Общее выражение для них имеет вид:

$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i). \quad (13)$$

Вектор деформаций $\{\varepsilon\}$ содержит все шесть компонент и определяется дифференцированием вектора перемещений по соответствующим координатным направлениям. Для используемой декартовой системы координат вектор деформаций определяется известным выражением вида (14):

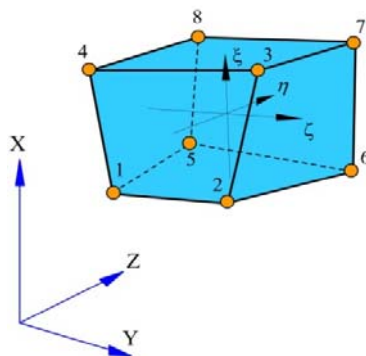


Рис. 1. Изопараметрический гексаэдр
объемного НДС

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

Составляющие вектора деформаций на конечном элементе определяется дифференцированием его функций формы по соответствующим координатным направлениям вектора упругих перемещений на элементе - $\{\delta\}^e$:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^{(e)} = [B_1, B_2, B_3, \dots, B_8]\{\delta\}^{(e)}; \quad (15)$$

вектор напряжений определяется выражением:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{r\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{zr}\}^T = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{\delta\}^{(e)}. \quad (16)$$

В выражениях (15) и (16): $[B]$ - матрица дифференцирования функций формы по независимым переменным (координатам) и $[D]$ – матрица упругости материала, определяемая на основе обобщенного закона Гука соотношением между компонентами деформации и напряжения теории упругости. Эти матрицы имеют вид:

$$[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad [D] = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 \\ \text{Сим.} & & & & & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где E - модуль упругости материала; μ - коэффициент поперечной деформации.

Интегрирование в выражениях (4), (5), (6), (8) и (9) осуществляется численно, с применением схем Гаусса-Лежандра. Переход от местной системы нормализованных координат - o, ξ, η, ζ (рис. 1) к глобальной системе - o, x, y, z осуществляется умножением подынтегральных выражений на матрицу Якоби (якобиан).

Для моделирования внешнего силового воздействия на породу в валках под давлением, в виде сжимающей силы $\bar{F}$ и крутящего момент $\bar{M}_{кр}$, разработан специальный тип КЭ - "жесткий" (rigid) (рис. 2). Его допустимо сравнить с невесомым стержнем с жесткостью - k , которая на 2-3 порядка больше жесткости исследуемой породы. Эта жесткость задается по определенной степени свободы в 2-х узлах КЭ модели. Матрица жесткости "жесткого" (rigid) КЭ имеет вид:

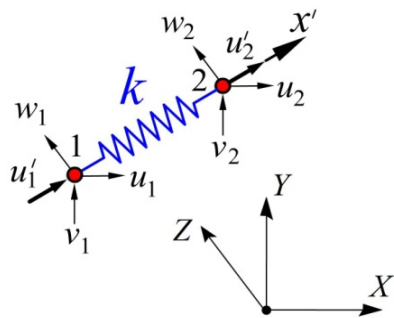


Рис. 2. Принципиальная схема работы жесткого элемента

$$[K']^{(k)} = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 & -k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k & 0 & 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где k - коэффициент большой жесткости.

Применение представленного типа КЭ достигается суммированием $[K']^{(k)}$ с глобальной

матрицей жесткости по данной степени свободы в узлах. Один из узлов КЭ типа "жесткий" является зависимым, другой независимым. Связь между ними осуществляется по трем переносным степеням свободы: TX, TY и TZ.

При моделировании работы роллер-пресса (рис. 3) независимый узел берется на опоре вала. Зависимые узлы используются для создания недеформируемых участков границ и для рассматриваемого процесса работы роллер-пресса они расположены по рабочей поверхности валков. Нагрузки на слой породы, в виде сжимающей силы $\bar{F}$ и крутящего момента $\bar{M}_{кр}$, прикладываются к узлу на опоре, что позволяет моделировать силовое воздействие на ось вала. Через "жесткий" элемент нагрузка передается на КЭ модель деформируемого слоя породы. Также, на рис. 3 представлены граничные условия на опорах.

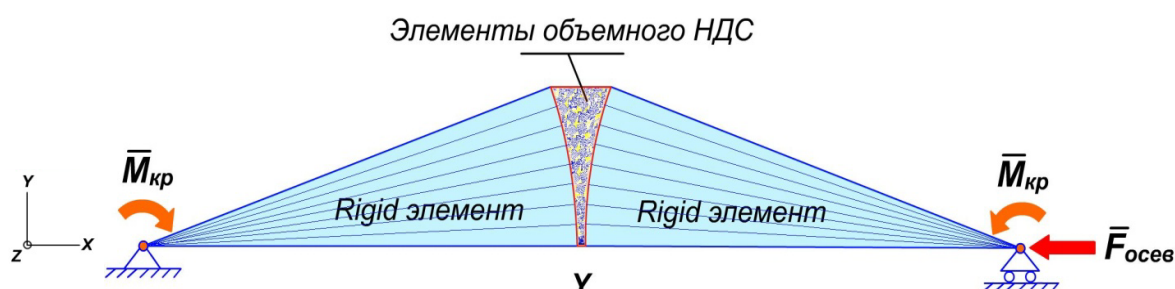


Рис. 3 Общий вид модели нагружения в роллер-прессе

Для моделирования контактного взаимодействия кусков породы в слое под давлением используется специальная модификация функционала (1) потенциальной энергии деформируемого объекта. То есть, в этом случае, величина производной энергии взаимодействия кусков породы, определяющая контактные силы, используется при формировании глобального вектора столбца сил.

Одновременно, формирование этого вектора сопровождается необходимой модификацией и в глобальной матрице жесткости.

Итерационный процесс решения нелинейной задачи организован относительно минимизации величины неравенства вектора контактных перемещений в глобальной системе алгебраических уравнений (11) рассматриваемой деформируемой системы контактирующих между собой тел.

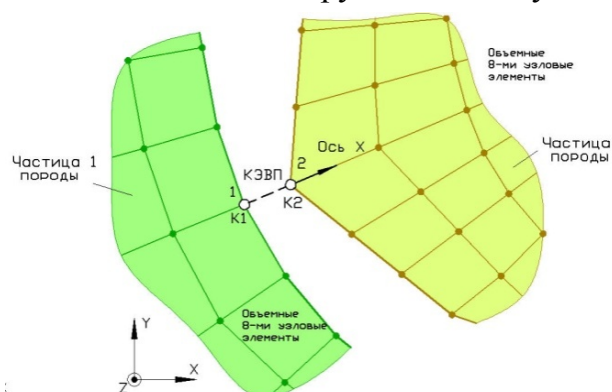


Рис. 4. Контактный элемент взаимодействия породы

Подход реализован с использованием специального контактного КЭ взаимодействия пород (КЭВП), работающего на принципе: "узел в узел".

Графически этот КЭ представлен линией соединения двух узлов 1 и 2 (рис. 4) или (рис. 5) узлами А и В, принадлежащими, соответственно, контак-

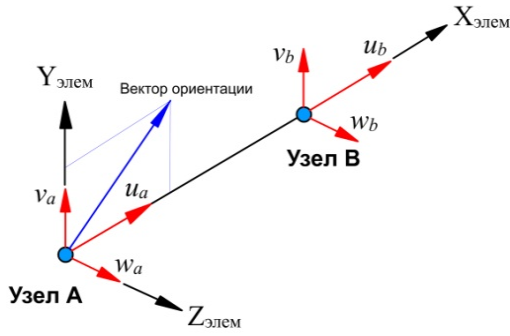


Рис. 5. Принципиальная схема КЭВП

тирующим частицам породы: 1 и 2.

Принципиальная схема работы КЭВП (рис. 5) построена с использованием местной (локальной) системы декартовых координат $x_{элемент}$, $y_{элемент}$, $z_{элемент}$, где за начало координат выбирается любой из двух узлов элемента, а значения u_a, v_a, w_a и u_b, v_b, w_b в ней являются упругими перемещениями, соответственно, узлов - **А** и **В**.

Моделирование энергии контактных сил - Λ_K , с применением КЭВП, проводится по аналогии с выражением для работы внешних сосредоточенных сил:

$$\Lambda_K = \sum_{j=1}^k \lambda_{K_j} = \{\delta_K\}^T \{F_K\}, \quad (19)$$

где $\{\delta\}$ и $\{F_K\}$ - глобальные векторы-столбцы, соответственно, неравенства поля упругих перемещений и контактных сил между узлами контактного элемента. Для узлов КЭВП, например, узлов **А** и **В** (рис. 5), имеем:

$$\{\delta_{AB}\} = \begin{Bmatrix} u_{AB} \\ v_{AB} \\ w_{AB} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u'_B - u'_A \\ v'_B - v'_A \\ w'_B - w'_A \end{Bmatrix}; \quad \{F_K\} = \begin{Bmatrix} F_n \\ F_\tau^y \\ F_\tau^z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_t & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \{\delta_K\}, \quad (20)$$

где K_n и K_t - величины нормальной (контактной) и касательной (трения) жесткости; u', v', w' - узловые перемещения в локальной системе координат КЭВП, переход от которой осуществляется посредством матрицы направляющих косинусов.

Глобальная матрица жесткости, представленная в выражении (11), при реализации контактной задачи НДС в МКЭ имеет симметричную блочно-диагональную структуру, где каждый её блок определяет матрицу жесткости отдельного куска породы. Соединение блоков осуществляется на основе топологической информации номеров узлов КЭВП, где каждый из них может иметь два состояния:

- КЭВП "открыт", что соответствует неравенству $u_{AB} > 0$, при этом K_n - берется малой величиной, необходимой и достаточной для положительного определения глобальной матрицы жесткости в выражении (11); $K_t = 0$;
- КЭВП "закрыт", что соответствует неравенству, $u_{AB} \leq 0$ при этом K_n - берется большой (штрафной) величиной и подбирается из условия не проникновения контактирующих узлов; K_t - вычисляется как произведение нормальной составляющей контактной жесткости на коэффициент трения.

При работе деформируемой среды контактирующих тел, состояние КЭВП может изменяться: от состояния "открыт", до состояния "закрыт" и наоборот.

Решением глобальной системы алгебраических уравнений (11) является вектор-столбец неизвестных упругих перемещений деформируемого объекта - $\{\delta\}$, представленный в узловых точках компонентами u, v, w в направлении осей x, y, z соответственно. На основе вектора $\{\delta\}$ определяются значения зависимых величин: деформации, напряжения и энергии деформации в КЭ модели. Полученные величины используются, в дальнейшем, в эмпирических зависимостях теорий дробления, при определении гранулометрической характеристики руды на выходе процесса её дезинтеграции.

2. Методология оценки основных технологических параметров дезинтеграции руды в слое частиц под давлением построена на основе теоретического определения их НДС и энергии деформирования, с последующим использованием этих результатов в теориях дробления, полученных эмпирически.

Методология, предложенная в данной работе, представляет собой комплекс разработанных задач составляющих анализ процесса разрушения руд с целью их последующего обогащения с точки зрения его энергоёмкости и эффективности. Результатом использования методологии является гранулометрическая характеристика разрушения минерального сырья, полученная на основе моделирования НДС и эмпирической теории дробления. Сущность методологии состоит в реализации алгоритма, представленного ниже и позволяющего оперативно решать задачи, поставленные в данной работе. Алгоритм состоит из 10 пунктов.

1. Анализ применения существующих теорий дробления. Выбор соответствующей рассматриваемому процессу разрушения эмпирической зависимости от носителя крупности исходного материала для определения гранулометрической характеристики продукта.

Одной из главных количественных закономерностей при дезинтеграции руд является зависимость гранулометрических параметров разрушения руды от величины работы внешних сил, определяющей в процессе дробления потенциальную энергию деформирования кусков минерального сырья. Таким образом, зная величину работы внешних сил и исходные размеры разрушаемых кусков руды в слое, можно оценить гранулометрический состав продукта процесса разрушения. Данная закономерность определяет теории дробления подходящие для различных условий дробления, главным образом, в зависимости от исходного гранулометрического состава породы. Обобщенная формула теорий дробления имеет вид:

$$W = k \cdot D^n \cdot \frac{R^{3-n} - 1}{3 - n}, \quad (21)$$

где, W - работа внешних сил, расходуемая на измельчение; n - степень у линейного размера частицы, определяемая опытным путем для каждого конкретного случая измельчения, k - коэффициент пропорциональности; R - степень измельчения.

Практика механического дробления горных пород показывает, что с уменьшением размера разрушаемых тел величина показателя степени n закономерно возрастает. При значениях $n = 2$ формула (21) переходит в формулу Риттингера, при $n = 3$ после раскрытия неопределенности получается формула Кирпичева-Кика и при $n = 2,5$ - формула Бонда в виде:

$$W = 2k \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right), \quad (22)$$

где W - работа, затрачиваемая на разрушение куска породы; D - диаметр куска породы до разрушения; k - коэффициент пропорциональности. Таким образом, показатель степени n отражает масштабный эффект в горных породах и их структурную неоднородность.

Коэффициент пропорциональности k имеет физический смысл удельной энергоемкости дробления. Это показано сравнением результатов интегрирования уравнения Чарльза с формулами дробления. Тогда, установив соответствие реального процесса дробления одному из этих уравнений, можно по опытным данным (W, D, d) количественно оценить энергоемкость дробления как свойства данной горной породы.

На основе изучения гранулометрического состава породы, полученного после её разрушения в роллер-прессе, а также, на основе обзора существующих теорий дробления, выявлено, что в наибольшей степени подходит частный случай, определяемый формулой Бонда.

На основании формулы (22), получаем формулу для вычисления диаметра частиц (кусков) руды после процесса дробления:

$$d = \frac{4k^2 \cdot D}{(W \cdot \sqrt{D} + 2k)^2}. \quad (23)$$

Согласно закону сохранения энергии, работа внешних сил, затрачиваемая на объемное воздействие на куски руды, реализуется в виде потенциальной энергии их деформации при данном технологическом процессе рудоподготовки, например, в слое частиц под давлением в роллер-прессе.

2. Разработка математической модели МКЭ и контактной задачи теории упругости для расчета потенциальной энергии деформации при взаимодействии кусков горной породы в технологическом процессе их дробления.

Разработанная математическая модель представлена выше (первое защищаемое положение) и обладает свойством универсальности. То есть, она использу-

ется при анализе взаимодействия кусков руды любых материалов, при любых параметрах технологического процесса их дезинтеграции.

3. Исследование точности, сходимости численного решения МКЭ анализа НДС минерального сырья, проводимое на основе известных экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях для одноосного сжатия образцов стандартной формы (ГОСТ 5219-50), а также на основе имеющегося для них аналитически замкнутого решения.

Основной целью представленного исследования является формирование представления о точности и сходимости применяемого численного решения МКЭ, что является необходимым условием для обоснования и проверки достоверности получаемых результатов. Исследование проводилось с учетом двух факторов.

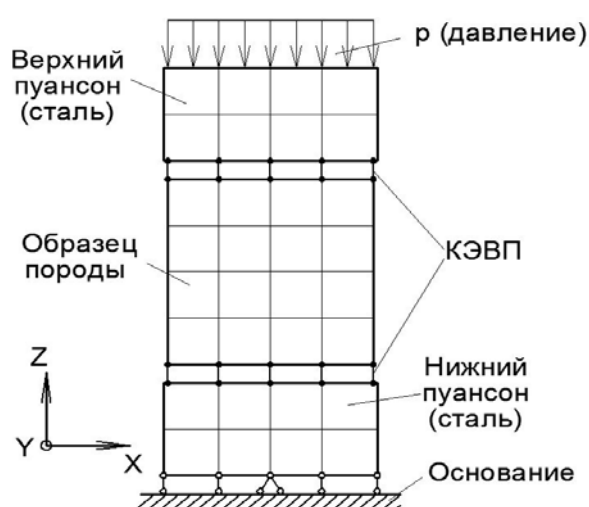


Рис. 6. Схема граничных условий, контактного и силового воздействия на образец породы в прессе

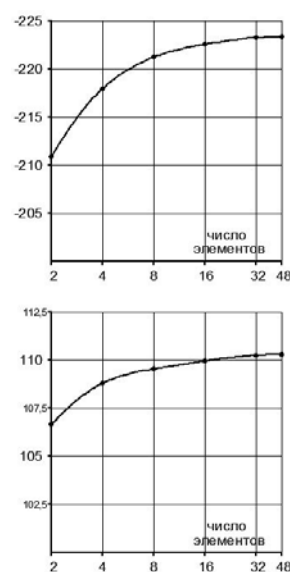


Рис. 7. Графики сходимости численного решения МКЭ по σ_{max} и τ , МПа.

Первый из них связан с аппроксимацией деформируемого тела конечными элементами (КЭ), то есть, достаточной для этого степенью его дискретизации. В случае представленного исследования дискретизация в моделях образцов горной породы проводится с использованием принципа "вложенности" количества КЭ на одном из линейных размеров тела (1, 2, 4, 8, 16, 32, ...). Сетка остальных размеров модели формируется адекватно дискретизации этого размера.

Второй фактор определяется степенью идеализации математической модели относительно физического объекта. Для интерпретации этого фактора представленное исследование построено с применением контактной задачи (рис.6), используемой, в данном случае, при моделировании взаимодействия образца породы с пуансонами пресса.

Результаты исследования точности и сходимости численного решения МКЭ приведены на рис. 7. Представленное исследование, вместе с математической моделью, обладает свойством универсальности и может использоваться при анализе

взаимодействии кусков руды любых материалов, при любых параметрах технологического процесса их дезинтеграции.

4. Построение геометрической модели расположения минеральных частей породы в слое между валками, с учетом гранулометрической характеристики исходного питания, осуществляется с применением анализа динамики падения кусков руды при загрузке роллер-пресса, при воздействии гравитационных сил и сил трения (рис. 8).

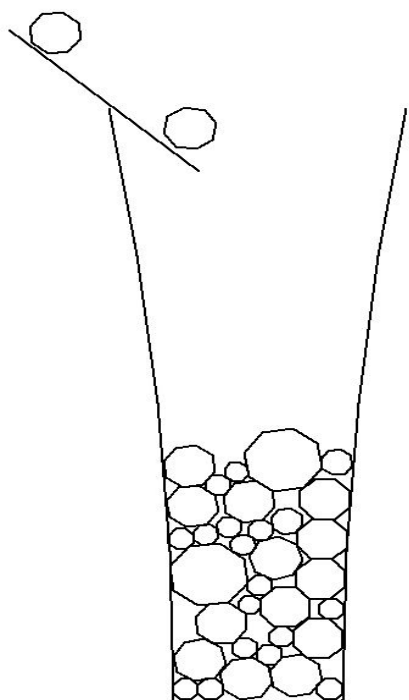


Рис. 8. Падение куска руды при загрузке роллер-пресса

В качестве геометрической формы кусков руды в моделируемом слое роллер-пресса выбраны правильные многогранники. Построение геометрической модели кусков руды осуществлялось в графическом редакторе AutoCAD. Учитывая хаотичность их расположения между валками, моделирование загрузки слоя роллер-пресса осуществляется с применением анализа динамики падения куска руды (рис. 8) с определенной высоты, а также его соударение с другими кусками, уже упавшими в модели слоя роллер-пресса и установка в слое. Математическое моделирование загрузки осуществляется с применением программного комплекса MSC.Adams. В этом решении учитывались параметры сил гравитации, трения и упругости руды. Силы сопротивления воздуха не учитывались.

5. Построение конечно-элементной (КЭ) модели слоя руды в валках под давлением для исходного питания, включающее: генерацию сетки КЭ для кусков породы, установку контакта, граничные условия кинематического закрепления деформируемой системы и моделирование внешних сил.

Модель геометрии оборудования и слоя руды построена в соответствии с основными данными по размерам рабочей части роллер-пресса и представленным выше моделированием загрузки руды.

Генерация сетки КЭ модели слоя осуществляется с использованием его геометрической модели, где основным типом КЭ является изопараметрический гексаэдр первого порядка аппроксимации. Также, с его использованием моделируется рабочая цилиндрическая часть валков роллер-пресса определенной толщины. Остальные части валков моделируются с применением "жесткого" КЭ.

Генерация сетки КЭ пространства между разрушаемыми объемами породы не проводится.

Моделирование контактного взаимодействия кусков руды между собой и с рабочей поверхностью валков осуществляется с использованием КЭВП.

Граничные условия кинематического закрепления деформируемой системы используются дважды: при выделении симметричной части слоя породы и валков роллер-пресса; и, при моделировании его опор.

Моделирование внешнего силового воздействия на породу в валках под давлением осуществляется посредством его передачи через КЭ типа "жесткий" (rigid) (рис. 2). При этом, сжимающая сила $\bar{F}$ и крутящий момент $\bar{M}_{кр}$ прикладываются к узлам на опорах (рис. 3). Данный пункт более подробно представлен в автореферате выше при описании первого защищаемого положения.

6. Учет ослабления породы, обусловленный наличием в ней трещин и различного рода дефектов, осуществляется через моделирование упругих свойств каждого куска породы в зависимости от их размеров (масштабного фактора). Вычисление модуля упругости кусков осуществляется на основе эмпирической формулы, предложенной Бароном Л.И. и полученной для экспериментальных данных определения пределов прочности образцов горной породы. Изменение модуля упругости, в этом случае, определяется выражением вида:

$$E_{e,2} = E_{e,1} \sqrt[3]{\frac{d_1}{d_2}}, \quad (24)$$

где $E_{e,1}$ - модуль упругости равностороннего куска руды с длиной ребра d_1 и высотой $h_1 = d_1$; $E_{e,2}$ - модуль упругости куска той же руды с длиной ребра d_2 и высотой $h_2 = d_2$.

В настоящей работе известная величина модуля упругости $E_{e,1}$ определяется экспериментально для стандартного образца (ГОСТ 5219-50), размером 50х50х50 мм. Модули упругости остальных (меньших) размеров образцов определяются из выражения (24). Таким образом, имея эмпирическое значение модуля упругости для одного размера разрушаемых кусков, вычисляется значения $E_{e,2}$ для любой другой их крупности. Затем эти значения модуля упругости используются при построении КЭ модели кусков слоя породы. Доказательство представленной зависимости (24) представлено ниже в третьем защищаемом положении.

7. Анализ напряженно-деформированного состояния КЭ модели слоя минеральных частиц в валках под давлением, с целью определения плотности потенциальной энергии их деформации.

Данный пункт подробно представлен в автореферате ниже, при описании четвертого и пятого защищаемых положений.

8. Определение средних размеров кусков продукта дробления для каждого исходного моделируемого куска руды в слое на основе полученной картины

распределения потенциальной энергии деформации и теории дробления. Данный пункт подробно представлен в автореферате ниже при описании пятого защищаемого положения.

9. Получение теоретической гранулометрической характеристики продукта дробления. Анализ достоверности результатов относительно экспериментальных данных. Данный пункт подробно представлен в автореферате ниже при описании пятого защищаемого положения.

10. Управление технологическими параметрами роллер-пресса с целью оптимизации энергопотребления и крупности продукта дробления. Данный пункт подробно представлен в автореферате ниже при описании пятого защищаемого положения.

Для проверки достоверности представленной методологии используются экспериментальные данные, приведенные в работе Э.А. Хопунова. Гранулометрические характеристики разрушения породы здесь получены (таблица 1, колонки 3,4,5) путем воздействия на образцы ударной силы. Работа этих сил (таблица 1, колонка 1) варьировалась в достаточно широком диапазоне.

Таблица 1

Влияние энергии деформации на гранулометрический состав продуктов разрушения

Работа внешних сил разрушения (натурный эксперимент), Дж	Модуль упругости Е, ГПа	Классы разрушения аглоспека, полученные опытным путем, мм			
		-55+40	- 40+5	- 5 + 1	d _{ср} , мм, всей навески, как М _{у(х)}
		d _{ср.кл1} = 46.3	d _{ср.кл2} = 8.9	d _{ср.кл3} = 1.7	
		Выход классов, %, (вероятность появления события)			
1	2	3	4	5	6
54,0	200,0	55,8	39,1	5,1	29,4
143,0	200,0	24.5	66,3	9,2	17,4
228,0	200,0	12.0	73,8	14,2	12,4

Значение диаметра исследуемого образца породы на входе, размером 100х100х300 мм, определяется как среднеарифметическое: $D_{cp} = 167$ мм. Материалом образца является аглоспек, в виде агломерата гидрогетитового концентрата (магнетит (крупные зерна)). Его модуль упругости $E = 200,0$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,1$.

Средний диаметр для каждого узкого класса на выходе после разрушения образца определяется по формуле:

$$d_{cp.кл.} = \frac{2d_1d_2}{d_1 + d_2} \quad (25)$$

где d_1 и d_2 - границы классов.

Определение среднего диаметра всей навески объемов аглоспека на выходе, для каждого уровня внешней работы (энергии) разрушения, осуществляется по формуле математического ожидания в виде:

$$M_{y(x)} = \sum_x y(x) \cdot p(x) \quad (26)$$

где $y(x)$ - среднее значение диаметра (случайной величины) на интервале (классе) x , $p(x)$ - вероятность появления $d_{ср.кл.}$ или в рассматриваемом случае выход данного класса. Например, для значения внешней работы разрушения равной 54 Дж, $d_{ср.}$ определяется по формуле (26) выражением вида:

$$\begin{aligned} d_{ср.} &= d_{ср.кл.1} \cdot p(d_{ср.кл.1}) + d_{ср.кл.2} \cdot p(d_{ср.кл.2}) + d_{ср.кл.3} \cdot p(d_{ср.кл.3}) = \\ &= 46,3 \cdot 55,8 + 8,9 \cdot 39,1 + 1,7 \cdot 5,1 = 29,4 \end{aligned}$$

Таблица 2

Сравнительный анализ влияния энергии деформирования на гранулометрический состав продуктов разрушения при проведении численного и натурального эксперимента

Энергия деформации КЭ модели образца аглоспека, Дж,	Диаметр на входе $D_{ср}$, мм образца (100x100x300)	Давление внешнего воздействия, в КЭ модели образца, МПа	σ_{max} , МПа	k Дж/м ³	Диаметр расчетный по формуле Бонда продукта дробления $d_{ср}$, мм	Отклонение расчетного и опытного диаметров, %
1	2	4	5	6	7	8
54	167	78.5	103.5	258,7	30,2	2,6
143		127.5	160.1	412,5	16.1	7,4
228		161.0	210,4	525.8	11,7	6,3

Построение КЭ модели образца аглоспека, анализ его НДС и энергии деформации проводился с применением контактной задачи теории упругости.

Результатом проверки представленной в работе методологии (таблица 2) является анализ справедливости формулы (23). Величина энергии деформации КЭ модели образца аглоспека (таблица 2, колонка 1) берется, в этом случае, равной внешней работе разрушения W (таблица 1, колонка 1) и определяется подбором величины давления внешнего воздействия на КЭ модель образца; коэффициент пропорциональности - k определяется как средняя величина удельной энергоемкости его деформирования (дробления).

Критерием проверки работы методологии является сравнение среднего диаметра на выходе, полученного экспериментальным путем (таблица 1, колонка 6), со средним диаметром на выходе, полученным теоретически (таблица 2, колонка 7). Значения этих диаметров согласуется для достаточно широкого диапазона изменения величины работы внешних сил.

Таким образом, в зависимости от, полученной расчетным путем, потенциальной энергии деформации кусков породы и используемой эмпирической формулы Бонда, вычисляется средний диаметр на выходе, позволяющий получить теоретически гранулометрическую характеристику процесса дробления породы.

3. Влияние размеров кусков породы (масштабного фактора) на процесс их деформирования учитывается в МКЭ модели анализа НДС через доказательство этой зависимости от модуля упругости.

Специфическая особенность прочностных характеристик материала минерального сырья, - это зависимость предела прочности куска руды от его размеров, называемая "Масштабным фактором". Использование этого фактора при моделировании напряженно-деформированного состояния руды, например, в слое частиц под давлением, позволит повысить точность определения энергозатрат, связанных с процессом рудоподготовки.

Очевидное объяснение представленному фактору может быть сформулировано следующим образом: большие по размеру куски руды содержат большее удельное количество трещин, включений, дислокаций и других подобных природных факторов структуры материала и, соответственно, они имеют меньший предел прочности и для их разрушения требуется меньшее удельное количество энергии, и наоборот, меньшие по размеру куски породы требуют большее удельное количество энергии для разрушения. Справедливость этого утверждения подтверждается и натурными испытаниями образцов горных пород, в частности при их одноосном сжатии. Эти испытания проведены для большого количества известных материалов горных пород, наличие трещин в которых является специфической особенностью их природного происхождения.

Доказательство влияния трещин на механические характеристики деформируемых тел представлено в работе Гриффитса, показанное на примере растяжения (сжатия) пластины с моделью трещины (рис. 9). Влияние трещины представлено на эпюре напряжения σ (рис. 9), а также отражено на диаграмме "напряжение - деформация" (рис. 10), где график прямой пропорциональной зависимости ОА получен при нагружении пластины без трещины, а график прямой пропорциональной зависимости ОС - при нагружении пластины с трещиной.

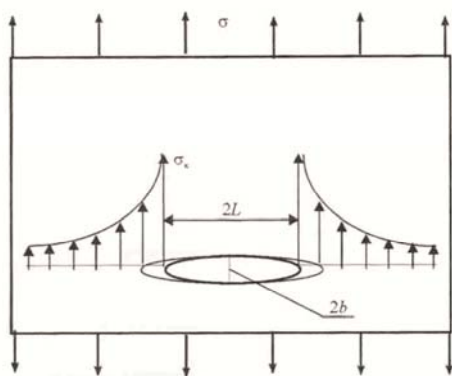


Рис. 9. Растяжение пластины с трещиной (модель Гриффитса)

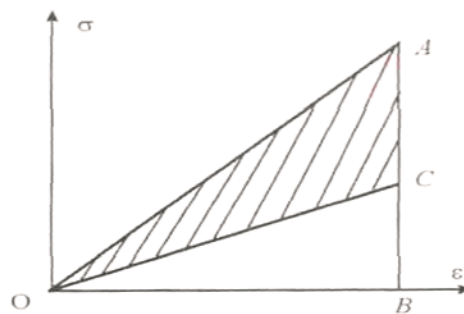


Рис. 10. Диаграмма "напряжение – деформация" пластины с трещиной Гриффитса

Энергетическое состояние пластин "с трещиной" и "без трещины" также определяется по диаграмме "напряжение – деформация" (рис. 10). Здесь, при заданном значении деформации пластин, величина накапливаемой потенциальной энергии деформации в пластине "без трещины" определяется площадью треугольника OAB , а для пластины "с трещиной" величина потенциальной энергии деформации соответствует площади треугольника OCB . Следовательно, для достижения одной и той же величины деформации пластины "с трещиной", в сравнении с пластиной "без трещины", необходимо меньше энергии, а также ей соответствует меньшее значение напряжения.

То есть, наличие трещины в материале деформируемого тела сопровождается на диаграмме σ - ϵ уменьшением площади под графиками диаграмм на величину, обозначенную (рис. 10) заштрихованным треугольником OAC . Представленное уменьшение произошло за счет изменения угла наклона прямой OA к прямой OC , а следовательно, с появлением трещины, происходит уменьшение (изменение) модуля упругости рассматриваемого деформируемого тела. Величина площади треугольника OAC (заштрихованного на рис. 10) зависит от размера трещины или, при малости размера трещин, от их количества, приходящегося на единицу объема деформируемого тела.

Таким образом, в пределах действия закона Гука, то есть, прямой пропорциональной зависимости между σ и ϵ , появление трещины в пластине сопровождается изменением угла наклона прямой пропорциональной зависимости. Тангенс этого угла и определяет модуль упругости пластин "с трещиной" и "без трещины", а возникающее при этом напряжение растяжения (сжатия) является величиной зависимой от него.

Доказательство справедливости гипотезы Гриффитса подтверждается натурными испытаниями образцов горных пород в отношении их разрушения одноосным сжатием. Эти испытания проведены на образцах практически всех извест-

ных материалов горных пород, наличие трещин в которых является специфической особенностью их природного происхождения.

Характер свойства "масштабного фактора" горных пород представлен в ряде известных работ, в которых, при его изучении, получены специальные эмпирические зависимости. Одним из вариантов таких зависимостей считается формула, предложенная в работе Л.И. Барона. В этой работе, на основе анализа большого количества натурных экспериментов (испытаний), показано, что влияние масштабного фактора, с достаточной для практики точностью, может быть описано эмпирической формулой вида:

$$\sigma_{сж_2} = \sigma_{сж_1} \sqrt[3]{\frac{d_1}{d_2}} \quad (27)$$

где $\sigma_{сж_1}$ - предел прочности одноосному сжатию равностороннего куска руды с длиной ребра диаметром d_1 и высотой $h_1 = d_1$;

$\sigma_{сж_2}$ - предел прочности одноосному сжатию образца той же породы с длиной ребра d_2 и высотой $h_2 = d_2$.

Правильность формулы (27) подтвердили данные румынского исследователя проф. М. Стаматиу.

Однако предельное напряжение является значением, полученным в момент разрушения образца и не отражает влияние масштабного фактора в самом процессе его деформирования. То есть, влияние этого фактора через предельное значение напряжения нельзя использовать в моделировании процесса деформирования горных пород.

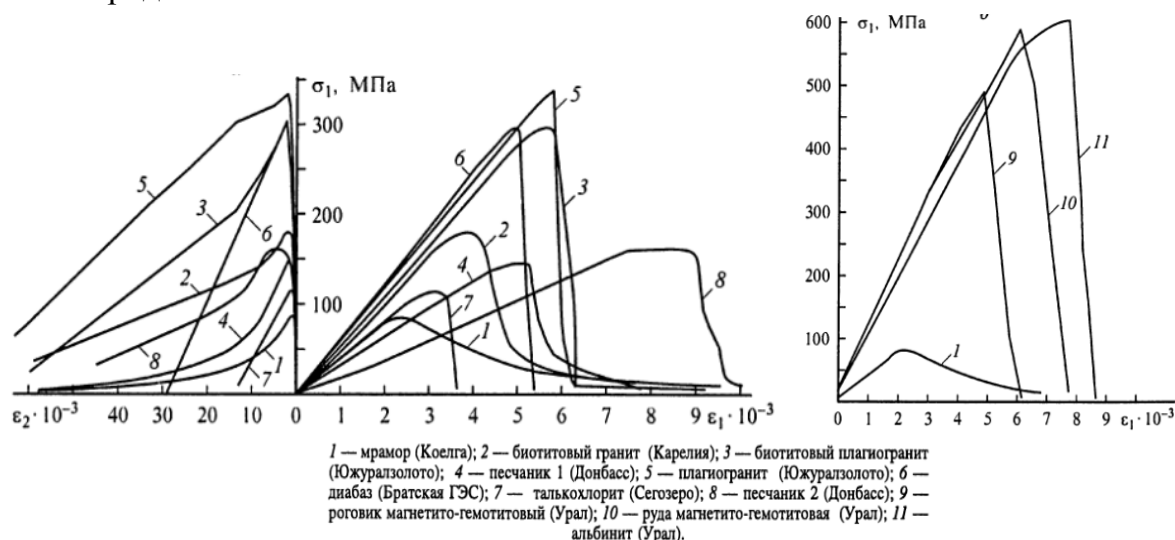


Рис. 11 Диаграмма "напряжение – деформация" образцов серии горных пород, испытанных при одноосном сжатии

Таким образом, учитывая зависимость предельного значения напряжения от модуля упругости, необходимо его использовать для учета масштабного фактора в моделировании процесса деформирования горных пород.

В этих условиях, прежде чем определить зависимость масштабного фактора горных пород от модуля упругости необходимо проанализировать некоторые особенности диаграмм "напряжение - деформация" образцов горных пород, полученных в лабораторных условиях их одноосного сжатия.

В частности, на рис. 11 представлены диаграммы, полученные в работе А.Н. Ставрогина, где цифрами показаны диаграммы различных типов достаточно большого числа материалов горных пород. Анализ этих диаграмм (рис. 11) показывает два отличительных свойства деформирования образцов горных пород.

Первое из них заключается в том, что, вплоть до момента наступления разрушения образца, при увеличении силы сжатия, сохраняется действие закона Гука (рис. 11). То есть, соотношение между напряжением, возникающим в теле образца, и его упругими деформациями определяется прямой пропорциональной зависимостью вида:

$$\sigma_{сж} = E_{сж} \cdot \varepsilon \quad (28)$$

где: $\sigma_{сж}$ - значение напряжения в образце в условиях одноосного сжатия;

$E_{сж}$ - модуль упругости на сжатие;

ε - величина деформации образца.

При этом величина деформации ε является постоянным значением (рис. 12), в связи с тем, что графиком диаграммы $\sigma - \varepsilon$ является прямая пропорциональная зависимость. Изменение величины $\sigma_{сж}$, в связи с масштабным фактором, может быть достигнуто только с изменением угла наклона прямой пропорциональной зависимости, который определяется через модуль упругости - $E_{сж}$.

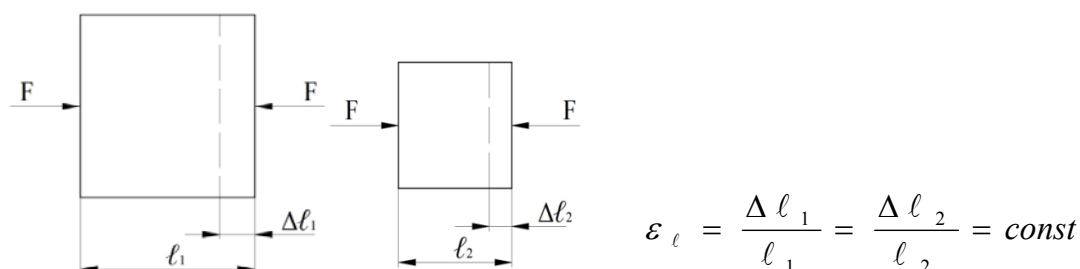


Рис. 12. Величина деформации кусков породы различных размеров.

С использованием известной зависимости обобщенного закона Гука, выражение для величины деформации образца породы имеет вид:

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 - \mu \cdot \varepsilon_2 - \mu \cdot \varepsilon_3), \quad (29)$$

где: μ - коэффициент поперечной деформации (Пуассона) при сжатии;

ε_1 - величина продольной деформации образца при сжатии;

$\varepsilon_2, \varepsilon_3$ - величины его поперечной деформации при сжатии.

Второе свойство горных пород (рис. 11) касается величины поперечной деформации образцов горных пород при одноосном сжатии. Оно заключается в том, что значения $\varepsilon_2 \cong \varepsilon_3$ в процессе одноосного сжатия не превышают 5% от продольной деформации (рис. 11, диаграмма слева).

Оба представленных свойства связаны с хрупким разрушением горных пород. То есть, величину деформации горных пород на всем пути повышения напряжения в процессе одноосного сжатия, вплоть до момента разрушения, допустимо считать величиной постоянной. Это означает, что при определении влияния масштабного фактора, предельное значение напряжения (временное напряжение разрушения) является величиной зависимой от изменения модуля упругости.

Таким образом, учитывая доказательство Гриффитса, а также экспериментальные данные об упругих свойствах горных пород вплоть до разрушения, зависимость для учета масштабного фактора допустимо построить на основе эмпирической зависимости Л.И. Барона в виде:

$$E_{e,2} = E_{e,1} \sqrt[3]{\frac{d_1}{d_2}} \quad (30)$$

где $E_{e,1}$ - модуль упругости равностороннего куска руды с длиной ребра d_1 и высотой $h_1 = d_1$; $E_{e,2}$ - модуль упругости куска той же руды с длиной ребра d_2 и высотой $h_2 = d_2$.

Экспериментальные исследования также показывают, что влияние размеров образцов сказывается на величине временного сопротивления раздавливанию лишь до некоторых пределов, после которых получаемые при экспериментах значения этого показателя остаются примерно постоянными. Представленное положение также свидетельствует в пользу влияния масштабного фактора на прочность горных пород через количество трещин, приходящееся на единицу объема материала породы.

Продолжая изучение прочности образцов породы от их размеров, необходимо отметить, что этому научному вопросу уделено внимание практически всеми авторами работ по определению прочностных свойств горных пород, где отражены все нюансы испытаний (смазка, прокладки и др.).

Формула Л.И. Барона основана на данных испытаний однородных образцов разных размеров, изготовленных по ГОСТу, кубической и цилиндрической формы диаметром до 50 мм (50x50x50 мм) в условиях испытания на одноосное сжатие (раздавливание), при постоянном отношении $d/h = 1$. При нагружении образцов давление в гидравлическом прессе повышают на 5-10 МПа в секунду. Предел прочности измеряют (вычисляют) с точностью до 10 МПа.

Представленное доказательство о влиянии масштабного фактора на крепость породы через модуль упругости её материала позволяет учитывать изменение этого параметра при построении моделей объемов породы на основе метода конечных элементов (МКЭ). Тем самым, более точно определять напряженно-деформированное и энергетическое состояние породы при силовом воздействии на неё со стороны валков в роллер-прессе.

Таблица 3

Изменение модуля упругости при изменении размеров куска

d, мм	d ₁ = 50	d ₂ = 30	d ₃ = 15	d ₄ = 5
$E_2 = f \cdot E_1$	$E_1 = 1.0 \cdot E_1$	$E_2 = 1.186 \cdot E_1$	$E_2 = 1.494 \cdot E_1$	$E_2 = 2.154 \cdot E_1$
руда мест.Нурказган, МПа	62 500	74 125	93 375	134 625

В таблице 3 и представлены значения модуля упругости горной породы месторождения Нурказган, в зависимости от размеров кусков кубической формы.

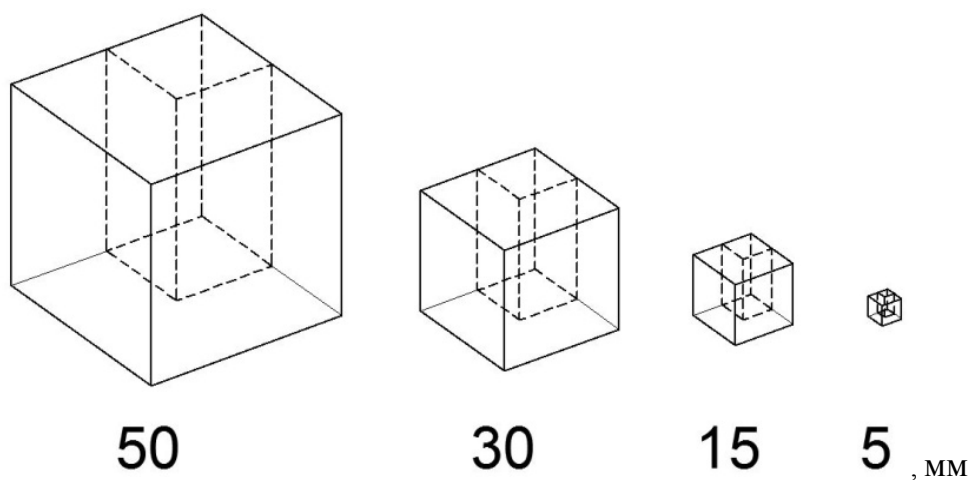


Рис. 13. Образцы различных размеров (мм), для исследования масштабного фактора.

Численное исследование проводилось на образцах с размерами, представленными в таблице 3, где основным геометрическим параметром является некоторый, характерный для определения гранулометрической характеристики, размер d, мм. Параметр f - является весовым коэффициентом учета масштабного фактора. Он определен на основании формулы (16). Единичное его значение взято для образца со стандартными размерами 50x50x50 мм.

σ_x , МПа

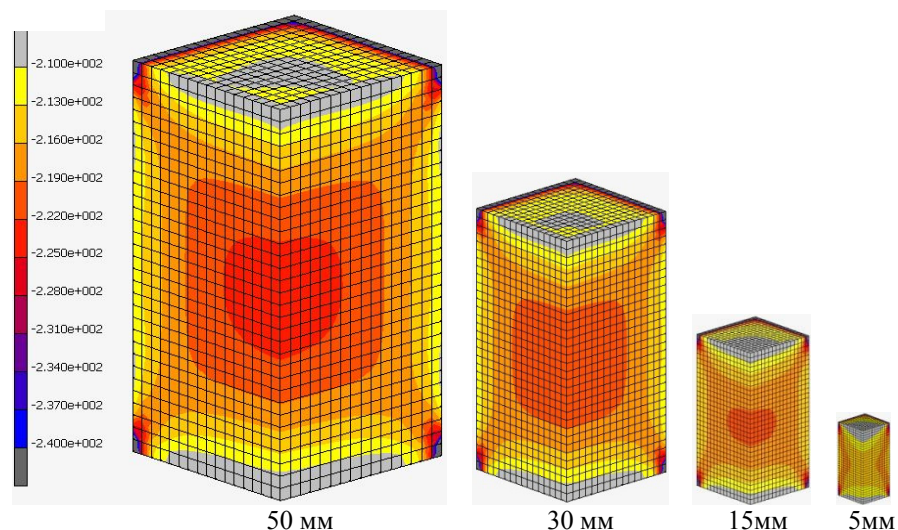


Рис. 14. Величина нормальных напряжений вдоль оси нагружения, МПа.

Силовым воздействием является давление в поршневом прессе величиной 200 МПа, приходящееся на единицу площади верхней поверхности образца.

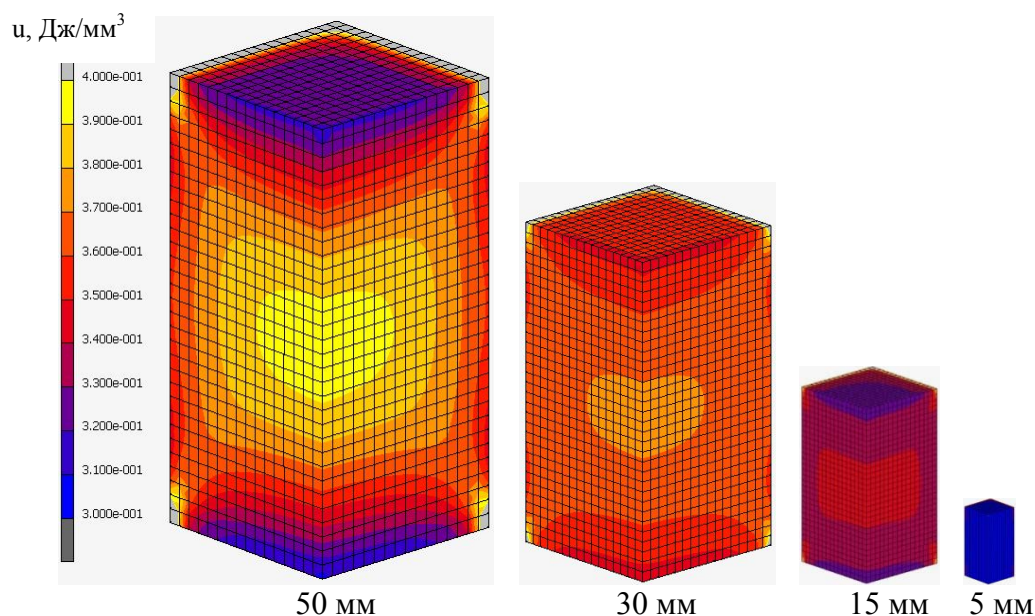


Рис. 15. Величина плотности потенциальной энергии деформации

Результаты исследования показывают, что с уменьшением размеров образцов при равной величине давления в поршневом прессе, среднееарифметическое значение величины напряжений остается постоянным. Однако степень неравномерности распределения поля напряжений (рис. 13) в образцах уменьшается.

Уровень деформаций (по абсолютному значению), с уменьшением размеров образцов снижается. Также, в образце снижается и степень неравномерности поля деформаций (рис. 16).

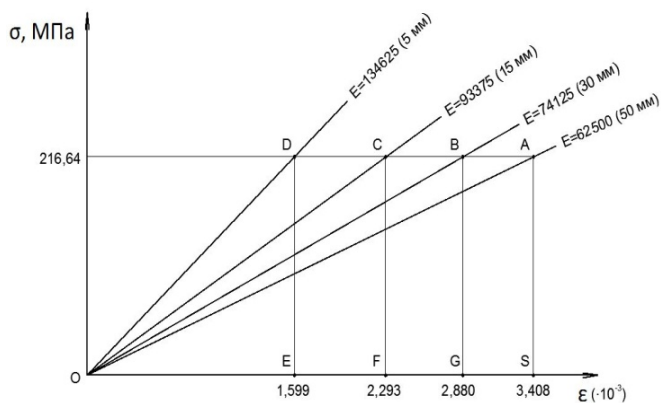


Рис. 16. Диаграмма сжатия. Влияние масштабного фактора на величину деформации образца

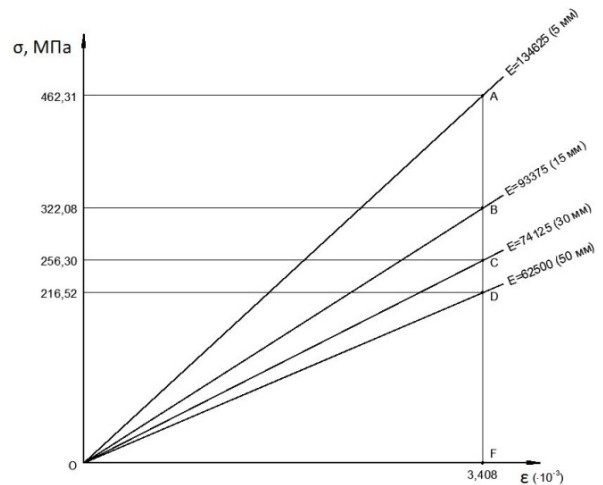


Рис. 17. Изменение диаграммы сжатия при изменении модуля упругости материала в зависимости от размера куска породы

Уровень средней плотности потенциальной энергии деформаций (рис. 15) также снижается, что подтверждает положение о том, что для дробления меньших по размеру кусков породы, требуется удельное большее количество потенциальной энергии деформации.

То есть, если процесс разрушения образцов проводить в поршневом прессе, то на образец с меньшими размерами потребуется большая удельная внешняя нагрузка или давление [МПа] (усилие, приходящееся на единицу площади). Если дробление руды будет происходить в роллер-прессе то, либо оно произойдет ниже по каналу между валками, либо потребуются большие значения сжимающей силы P или крутящего момента $M_{кр}$.

4. Механизм разрушения кусков руды в слое частиц под давлением определяется градиентом нормальных напряжений, полученный из качественно-количественной картины НДС.

Селективное разрушение руд при механическом воздействии реализуется тогда, когда разрушаемому материалу сообщается необходимый и достаточный для соответствующих минеральных компонентов уровень параметров, а именно усилия разрушения, величины деформации, энергии разрушения. То есть, необходим поиск путей управления процессом разрушения руды, одним из которых является подбор адекватного оборудования для конкретных свойств исходного материала. Решение этих задач возможно только на основе полного понимания механизма разрушения с учётом свойств, определяющих его поведение при взаимодействии с рабочими органами.

Анализ большого числа экспериментальных результатов показал, что в условиях объемного неравнокомонентного сжатия, когда $\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$ и $0 \leq \mu \leq 1$,

минеральное сырьё разрушается за счёт скачкообразного прорастания критически ориентированных сдвиговых трещин. На основе этого анализа можно выдвинуть гипотезу о наличии сдвигового механизма разрушения материала в роллер-прессе, который является основной причиной процесса дезинтеграции. Экспериментальные данные, полученные в работах профессора Ставрогина А. Н. для исследуемых деформируемых тел в виде руды, также показывают, что в качестве предела прочности целесообразно использовать максимальные сдвиговые (касательные) напряжения в них, выраженные через максимальные и минимальные главные напряжения. Таким образом, на основе выше представленного обзора экспериментально-аналитических данных можно сделать утверждение, что при расчёте сложного напряжённого состояния материала кусков руды, например, в слое между валками роллер-пресса, для определения предельного значения характеристики прочности целесообразно использовать критерий Мора.

В нашем случае между валками, при наличии бокового давления, существует возможность смещения зёрен друг относительно друга из-за неоднородности всего слоя материала по крупности. Это условие необходимо для повышения эффективности разрушения, снижения энергетических затрат и селективности раскрытия минералов по границе зёрен. В свою очередь экспериментально доказано, что при отсутствии условия неоднородности слоя материала или же при отсутствии слоя как такового, разрушение происходит с нарушением целостности зёрен и резким возрастанием затрат энергии.

Для подтверждения данной гипотезы была создана математическая модель напряженно-деформированного состояния руды в слое частиц под давлением и проведен анализ картины НДС.

На рис. 18 представлена картина максимальных напряжений сжатия в слое породы в валках под давлением, где выделен фрагмент слоя. На фрагменте просматривается процесс разрушения породы, с точки зрения появления в ней предельных значений напряжений в местах взаимодействия отдельных кусков породы между собой и валками роллер-пресса.

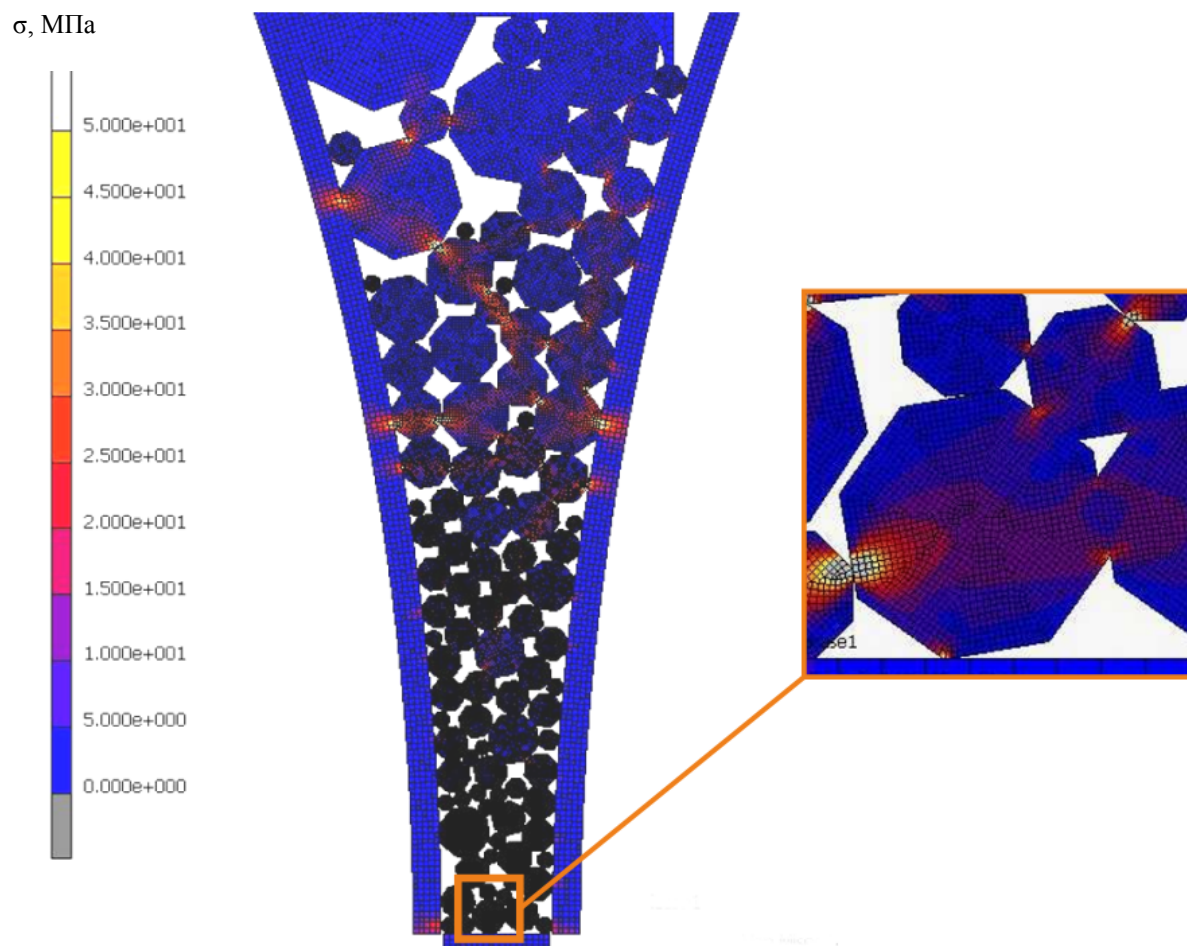


Рис. 18. Картина сдвиговых напряжений в слое горной породы в валках под давлением, где дополнительно выделен фрагмент слоя

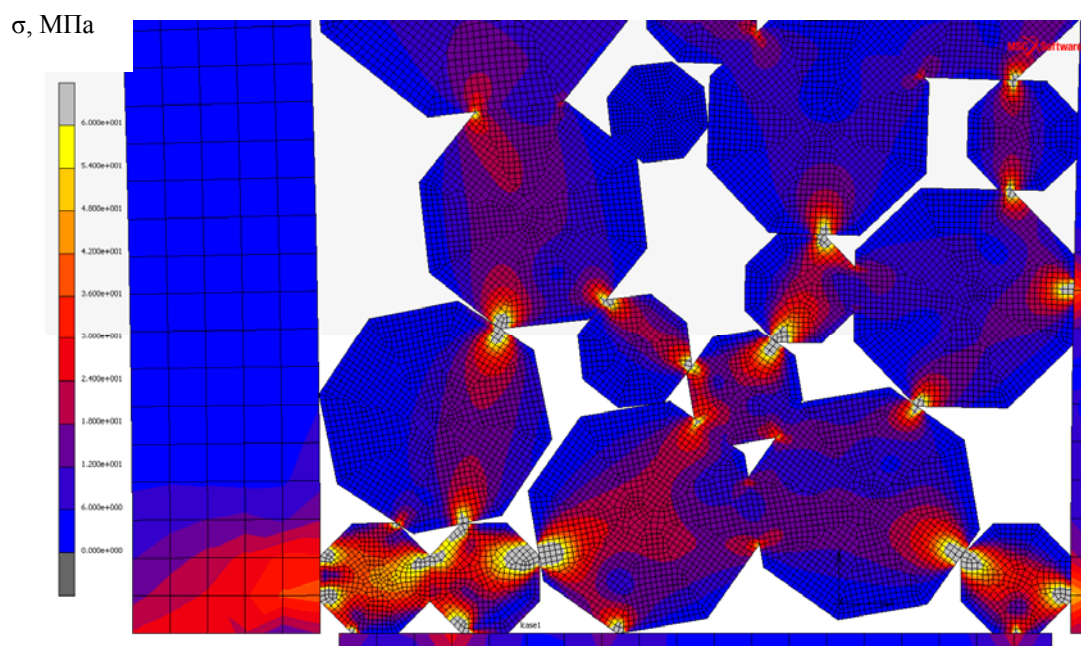


Рис. 19. Картина сдвиговых напряжений, с появлением в кусках руды предела упругости

На рис. 19 представлен фрагмент нижней части слоя породы в валках под давлением, где имеют место запредельные относительно предела упругости значения напряжений. Относительно этой картины определяется величина накапливаемой потенциальной энергии деформации и, соответственно, размеры кусков на выходе породы, а также сам механизм разрушения кусков породы в роллер-прессе.

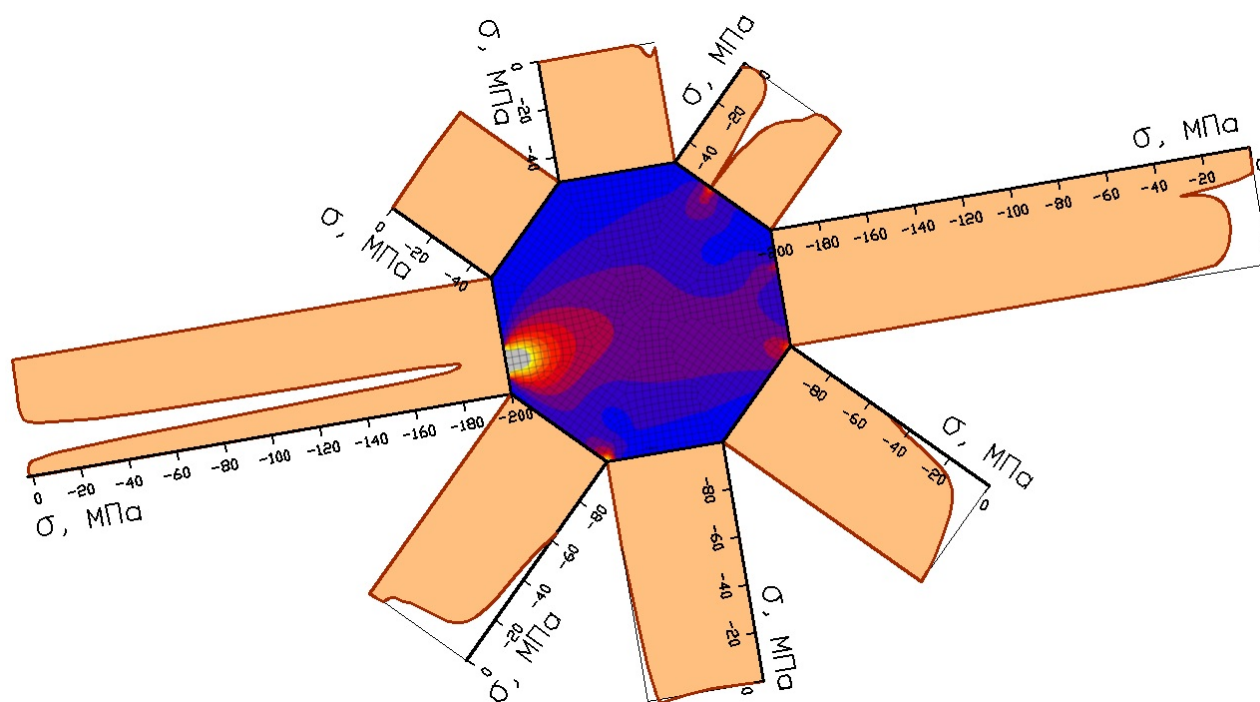


Рис. 20. Эпюра максимальных нормальных напряжений по контуру куска горной породы.

Картина, представленная на рис.19 и 20 показывает, что для каждого куска породы, выделенного из слоя породы роллер-пресса, имеет место, как минимум 3 зоны концентрации напряжений по его контуру, показанных изменением цветовой палитры, в 2-х из которых напряжения близки к пределу прочности материала.

На рис. 20 представлены эпюры величины нормальных напряжений, возникающие по контуру этого куска породы в процессе его сжатия в слое роллер-пресса. Картина наглядно показывает, что в местах концентрации наблюдается высокий градиент нормальных напряжений, что, в свою очередь, означает высокие параметры деформаций и, соответственно, напряжений сдвига.

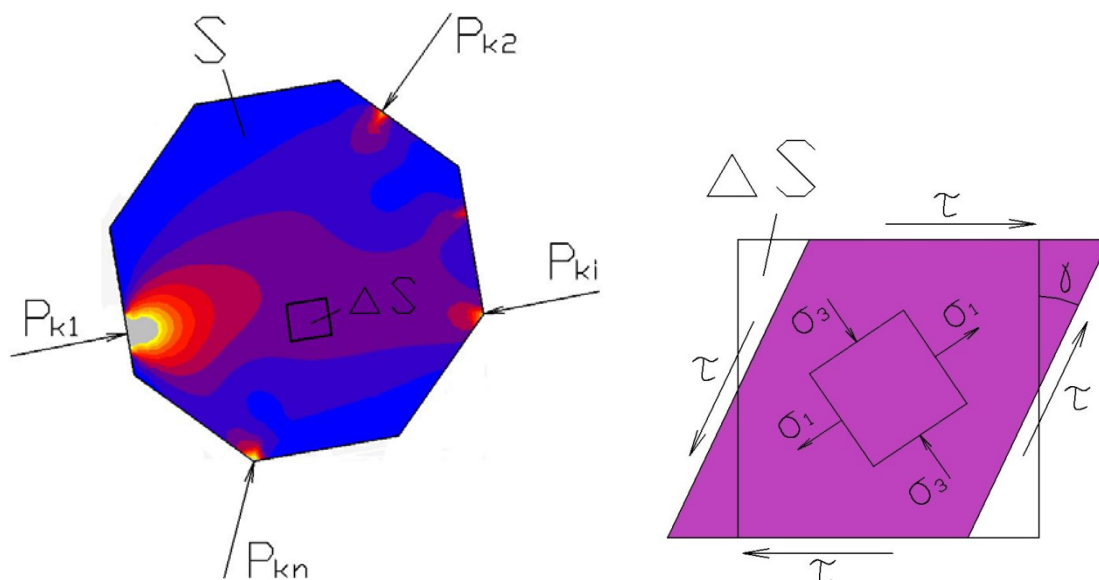


Рис. 21. Поле максимальных нормальных напряжений, определяющих появление максимальных касательных напряжений, где P_i – силы, τ – сдвиговые напряжения; σ – главные осевые напряжения.

Из наличия на рассматриваемом куске породы явно выраженной плоскости сдвига между двумя впадинами по нормальным напряжениям, следует, что разрушение куска горной породы наступит раньше ожидаемого. Такие же градиенты наблюдаются на большинстве разрушаемых кусках горной породы в слое под давлением.

На рис. 21, на примере одного из выделенных кусков породы, показан механизм появления максимальных касательных напряжений. Выделенная в любом месте куска породы элементарная площадка ΔS (рис. 21, слева), подвергается деформированию со стороны соседних кусков породы в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами (P_i) (рис. 21, справа). Данные силы определяют появление максимальных сдвиговых (касательных) напряжений τ , зависящих от, возникающих в куске горной породы максимальных нормальных напряжений σ .

Таким образом, механизм разрушения материала в слое под давлением между валками основан на наличии сдвига.

5. Прогноз гранулометрической характеристики дезинтегрированной руды в слое частиц под давлением без проведения натурного эксперимента, позволяющий снизить затраты и время на разработку технологии.

Построение графиков гранулометрического состава, полученных на основе теоретического анализа, выполняется для каждого куска руды в слое на основе определения его потенциальной энергии деформации.

В таблице 4 приведен гранулометрический состав исходного питания, поступающего в дробилку.

Таблица 4

Гранулометрический состав разгрузки роллер-пресса, натурный эксперимент

Фракция, мм	Выход фракции, %	Выход по “-”, %
-16+12	5,1	100
-12+5	26,5	94,9
-5+2,6	10,4	68,4
-2,6+1	12,5	58,0
-1+0,59	5,9	45,5
-0,59+0,21	11,4	39,6
-0,21+0,074	9,2	28,2
-0,074+0	19,0	19,0
Всего	100	

Таблица 5

Гранулометрический состав разгрузки роллер-пресса, расчетный

Фракция, мм	Выход фракции, %	Выход по “-”, %
-16+12	7,87	100
-12+5	24,89	92,13
-5+2,6	12,83	67,24
-2,6+1	14,21	54,41
-1+0,59	7,56	40,2
-0,59+0,21	7,52	32,64
-0,21+0,074	8,02	25,12
-0,074+0	17,1	17,1
Всего	100	

Гранулометрическая характеристика получена расчетным методом (таблица 5) из НДС картины слоя частиц. При этом анализируется НДС каждого куска в слое, после чего определяется энергия деформации каждого куска. По формуле определяется прогнозный диаметр кусков для каждого куска в слое:

$$d = \frac{4k^2 \cdot D}{(W \cdot \sqrt{D} + 2k)^2}$$
, где D – начальный размер куска, мм; W – энергия деформации куска, Дж; k – коэффициент энергоемкости.

Далее с помощью дополнительной программы подсчитывается прогнозируемое количество кусков, полученных из каждого начального диаметра, и записывается в массив, образуя тем самым гранулометрическую характеристику продукта разрушения.

На рис. 22 приведено сравнение гранулометрических характеристик дробленого продукта, полученного при натурном эксперименте и расчетным методом из модели. Среднее квадратичное отклонение составило 3,7 %.

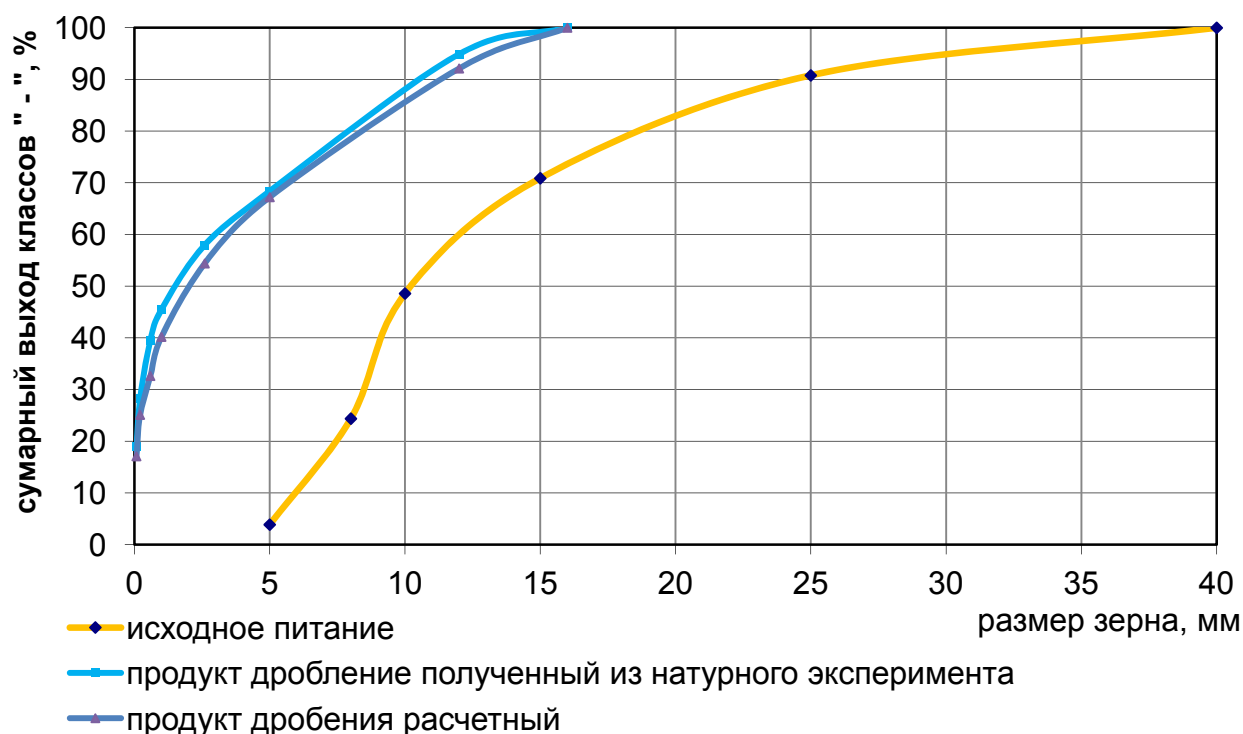


Рис. 22. Сравнение гранулометрических характеристик продукта дробления по «-» руды, полученные из натурального эксперимента и из модели.

При натурном эксперименте, при сравнении измельчаемости разгрузки валкового пресса с исходной рудой установлено, что измельчаемость материала после валкового пресса в среднем в 1,2 раза выше, чем исходной руды, максимальный коэффициент измельчения 1,45.

Результаты проведенных исследований процесса дезинтеграции руды в слое частиц и в частности методология определения основных технологических параметров разрушения легли в основу следующих проектов горно-обогатительных предприятий: ЗАО ГРК «Западный» (Иркутская обл.), ГОК «Нурказган» (Республика Казахстан), ГОК «Васильковский» (Республика Казахстан).

С целью уменьшения эксплуатационных затрат на шаровое измельчение руды на стадии рудоподготовки на ГОКе «Западный» предложено применение операции тонкого дробления с помощью роллер-пресса, что позволяет получать дробленый продукт крупностью менее 1 мм. При проектировании и наладке роллер-пресса давление на валки и их скорость вращения подобраны с использованием исследований, проведенных на выше представленной математической модели напряженного состояния кусков разрушаемой руды. В результате проведенных исследований была рекомендована технологическая схема, основанная на использовании роллер-пресса и центробежных концентраторов (рис. 23).

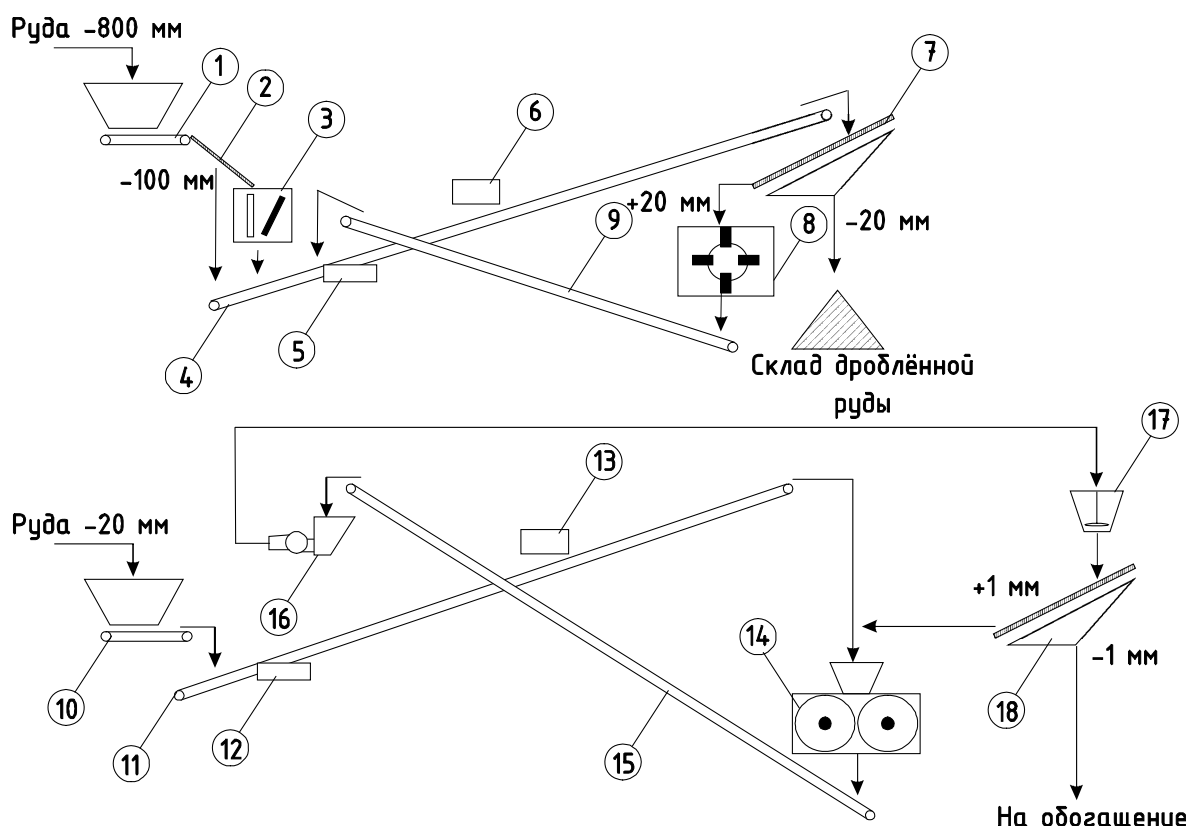
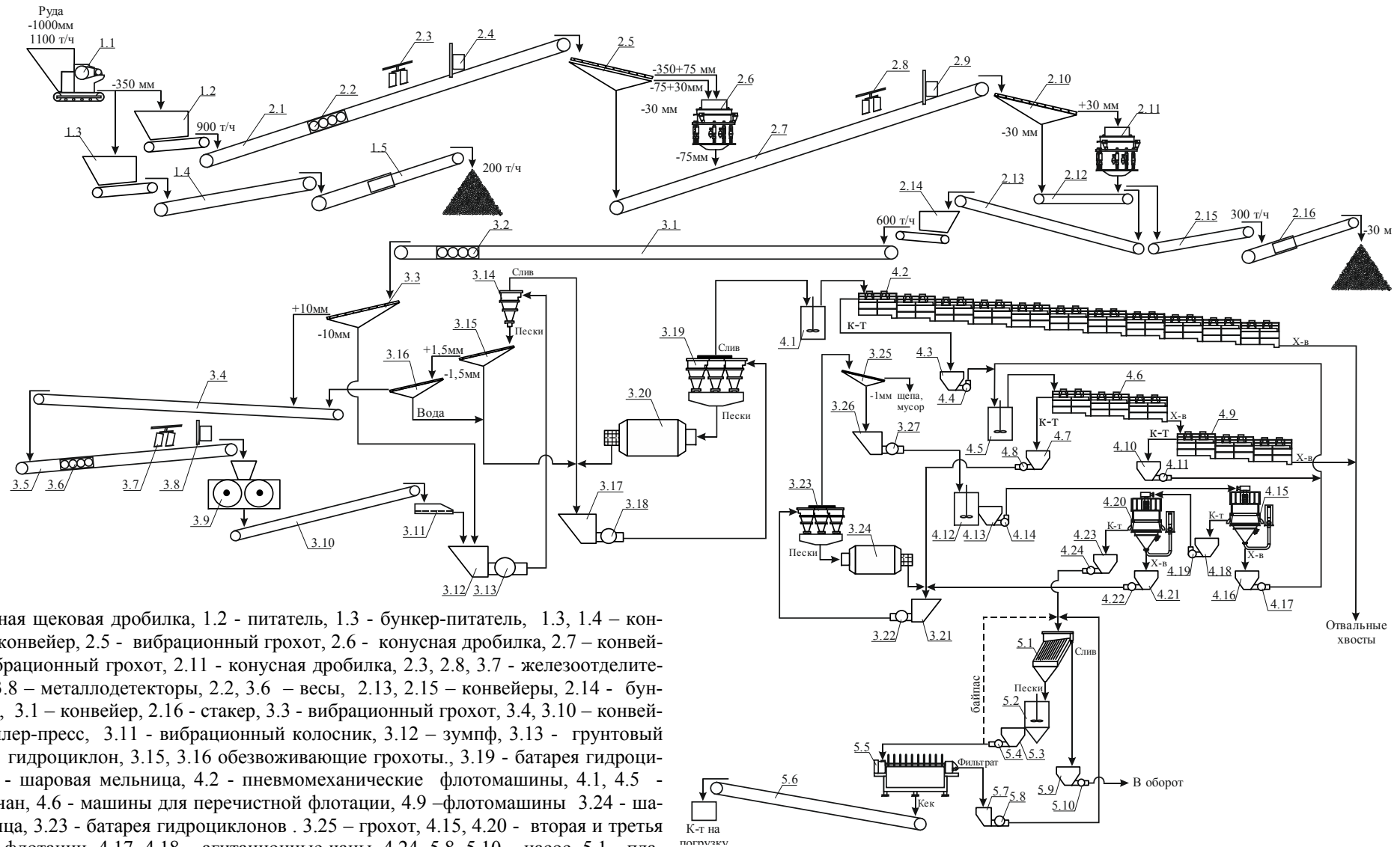


Рис. 23. Принципиальная схема цепи аппаратов операций рудоподготовки золотоизвлекательной фабрики на месторождении «Западное»: 1 – бункер питатель; 2 – колосниковый грохот; 3 – щековая дробилка; 4 – конвейер; 5 – весы; 6 – электромагнит; 7 – вибрационный грохот; 8 – роторная дробилка; 9 – возвратный конвейер; 10 – бункер питатель; 11 – конвейер; 12 – весы; 13 – электромагнит и металлодетектор; 14 – роллер пресс – конвейер; 16 – зумпф-насос; 17 – дезинтегратор; 18 – грохот.

Для ГОКа «Нурказган» рекомендована и детально обоснована технология обогащения медной руды, обеспечивающая получение товарной продукции в виде медного концентрата. С целью уменьшения затрат на рудоподготовку предлагается применение операции тонкого дробления в дробилке высокого давления, позволяющей получать продукт крупностью менее 1,5 мм.

Основной принцип, заложенный в схему, – использование эффективной технологии рудоподготовки – разрушения руды в слое частиц под давлением при вскрытии ценного компонента и извлечение меди в пневмомеханических машинах (рис. 24).



1.1- самоходная щековая дробилка, 1.2 - питатель, 1.3 - бункер-питатель, 1.3, 1.4 – конвейер, 2.1 – конвейер, 2.5 - вибрационный грохот, 2.6 - конусная дробилка, 2.7 – конвейер, 2.10 - вибрационный грохот, 2.11 - конусная дробилка, 2.3, 2.8, 3.7 - железоотделители, 2.4, 2.9, 3.8 – металлодетекторы, 2.2, 3.6 – весы, 2.13, 2.15 – конвейеры, 2.14 - бункер-питатель, 3.1 – конвейер, 2.16 - стакер, 3.3 - вибрационный грохот, 3.4, 3.10 – конвейер, 3.9 - роллер-пресс, 3.11 - вибрационный колосник, 3.12 – зумпф, 3.13 - грунтовый насос, 3.14 - гидроциклон, 3.15, 3.16 обезвоживающие грохоты., 3.19 - батарея гидроциклонов, 3.20 - шаровая мельница, 4.2 - пневмомеханические флотомашины, 4.1, 4.5 - контактный чан, 4.6 - машины для пересортной флотации, 4.9 – флотомашины, 3.24 - шаровая мельница, 3.23 - батарея гидроциклонов, 3.25 – грохот, 4.15, 4.20 - вторая и третья пересортные флотации, 4.17, 4.18 – агитационные чаны, 4.24, 5.8, 5.10 – насос, 5.1 - пластинчатый сгуститель, 5.2 - промежуточный чан, 5.5 - вакуум-фильтр, 5.6 – конвейер.

Рис. 24. Рекомендуемая схема цепи аппаратов обогатительной фабрики для переработки руды месторождения “Нурказган”

Для обогатительной фабрики на месторождении «Васильковское» рекомендована и обоснована технологическая схема, основанная на гравитационно-флотационном обогащении руды с последующей гидрометаллургической переработкой объединенных концентратов. Основным принципом, заложенный в схему, – использование экономически рациональной технологии дезинтеграции руды в слое частиц под давлением при вскрытии ценного компонента, извлечение золота при гравитационном и флотационном обогащении и гидрометаллургическая переработка полученных концентратов.

Согласно данным технологических исследований, оптимальная конечная крупность измельчения составляет 90% $-0,074$ мм. Для данных условий рекомендуется перед шаровым измельчением включить стадию дробления и разупрочнения руды в валковой дробилке высокого давления – роллер-пресс RP-16-170/180. Данная схема с использованием роллер-пресса позволяет получить до 15% класса $-0,074$ мм в разгрузке цикла тонкого дробления.

Рекомендуемая схема переработки руд месторождения «Васильковское» показана на рисунке 25.

Оборудование обогатительной фабрики включает следующие позиции (рис. 26): 1.1 – конвейер, 1.2 – питатели, 1.3, 1.4 – ленточный конвейер, 1.4.1 – железоотделитель, 1.4.2 – металлодетектор, 1.5, 1.7 – конусная дробилка, 1.6 – вибрационный грохот, 1.8 – конвейер, 2.1 – распределитель, 2.2 – накопительные бункеры, 2.3 – вибрационные питатели, 2.4 – конвейер, 2.5 – роллер-пресс, 2.5.2 – делитель, 2.6, 2.7 – конвейеры, 2.6.1 и 2.7.1 – весы, 2.7 – конвейер, 2.8 – шаровые мельницы, 2.9 – зумпф, 2.11 – гидроциклоны, 2.12 – флотомашины, 3.5 – флотомашины, 2.16 – насос, 2.17 – батарейный гидроциклон, 3.1 – основная флотация, 2.18 – центробежный сепаратор, 2.19 – зумпф с мешалкой, 3.2 – контрольная флотация, 3.7, 3.14 – насос, 3.8 – вторая перерешивная флотация, 3.15 – распределительный зумпф, 3.16 – центробежные сепараторы с непрерывной разгрузкой концентрата, 3.17 – сепаратор, 3.20 – зумпф, 3.21 – насос, 5.1 радиальные сгустители, 5.2 – насос, 2.23, 3.24, 3.25, 4.7, 4.15, 4.24, 4.26, 5.3 – дренажные насосы, 3.22, 3.23 – пульповые пробоотборники.

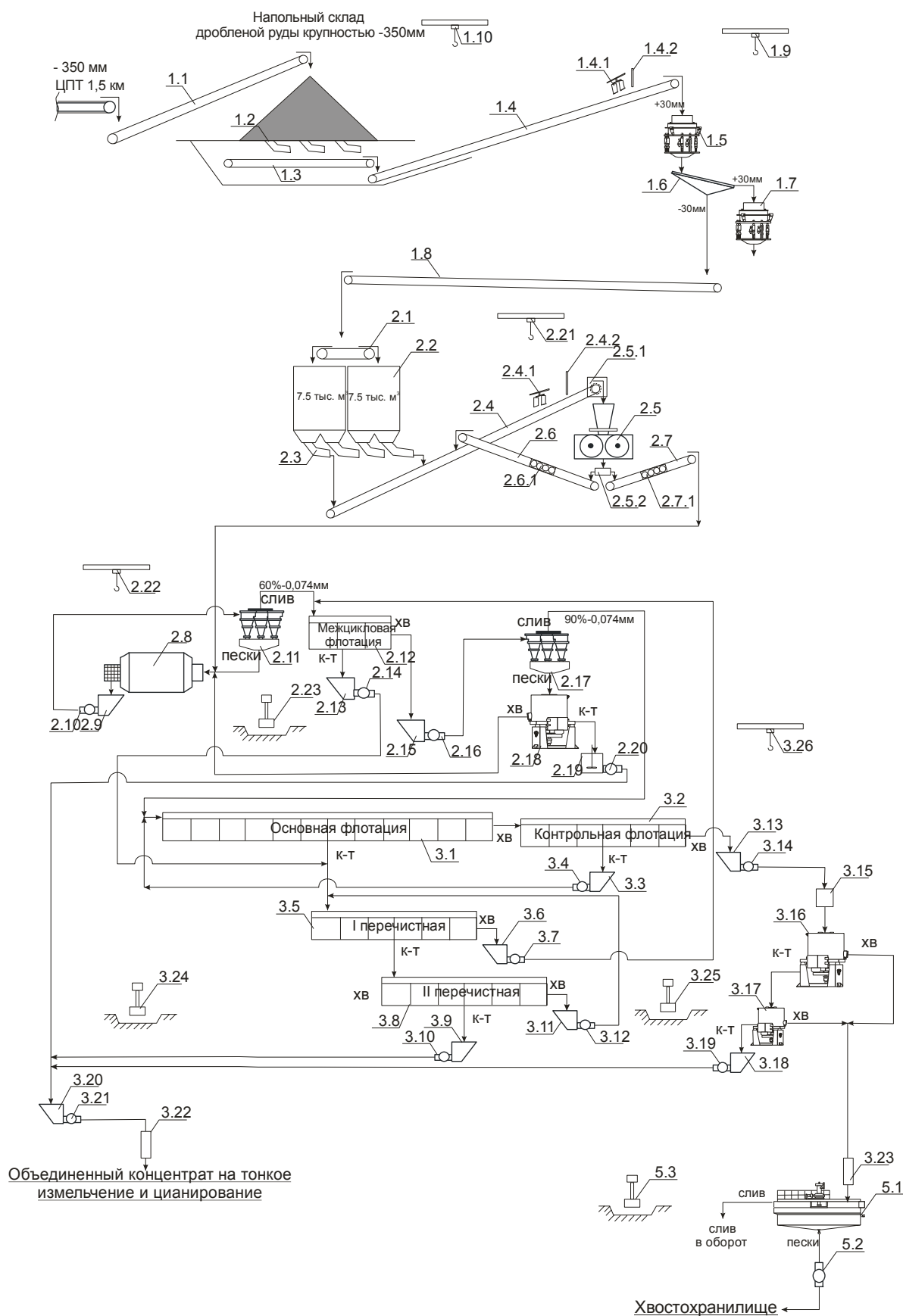


Рис. 25. Схема цепи аппаратов обогатительной фабрики на месторождении «Васильковское»

Внедрение разработанной методологии определения технологических параметров дезинтеграции руды в слое частиц позволило сократить объем полупромышленных испытаний с целью получения проектных показателей для технологических схем тонкого дробления горно-обогатительных комбинатов «Западный», «Нурказган» и «Васильковский».

Проектирование узла объемного разрушения руды в валковом прессе на ГОКе «Западный», с использованием методологии определения основных технологических параметров дезинтеграции, позволило получить реальный экономический эффект в объеме 8540 тыс. руб.

Стоимость полупромышленных испытаний по измельчаемости руд с целью выбора оборудования узла тонкого измельчения для ГОКа «Нурказган» составила 2027 тыс. руб. Стоимость работ при реализации методологии определения основных технологических параметров дезинтеграции руды в слое частиц под давлением для месторождения «Нурказган» составила 270 тыс. руб. При этом ожидаемый экономический эффект составил 1757 тыс. руб. Эффект получен за счет экономии средств на проведение полупромышленных испытаний.

Стоимость полупромышленных испытаний по измельчаемости руд для роллер-пресса на ГОКе «Васильковский» составила 5285 тыс. руб. Экономический эффект от применения методологии определения основных технологических параметров дезинтеграции руды в слое частиц под давлением вместо полупромышленных испытаний роллер-пресса по измельчаемости руды на «Васильковском» ГОКе составил 5053 тыс. руб.

Запуск узла тонкого дробления на ГОКе «Васильковский» требует периода до 3 месяцев для выхода на проектные технологические показатели. Проектное извлечение составляет 87%. Применение методологии определения основных технологических параметров дезинтеграции руды в слое частиц под давлением при вводе в эксплуатацию ГОКа «Васильковский» позволило оптимизировать технологические показатели узла тонкого дробления, что приводит к сокращению сроков выхода на проектные технологические показатели на 2.2 месяца, при этом ожидаемый экономический эффект составил 39600 тыс. руб.

Основные выводы.

Диссертационное исследование является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение актуальной научной проблемы, а именно установление механизма дезинтеграции руд в слое частиц под давлением и оптимизация процесса разрушения геоматериала в валковых прессах, которая имеет важное хозяйственное значение при переработке минерального сырья.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнен систематический анализ способов дезинтеграции руды, реализующихся в дробильно-измельчительных аппаратах перед ее обогащением. Выявлено, что одним из высокоэффективных современных способов рудоподготовки является способ дезинтеграции руды в слое частиц под давлением. Показано, что существует возможность развития теорий дробления, применяемых для обоснования методик расчета энергетических затрат при дезинтеграции руды в слое частиц под давлением.

2. Предложена концепция изучения процесса дробления горной породы, заключающаяся в применении современных технологий математического моделирования и использовании эмпирических зависимостей крупности кусков руды и энергетических затрат на разрушение, что позволяет проводить прогнозирование процесса задолго до начала его натурной реализации в промышленном объеме.

3. Доказано влияния масштабного фактора на крепость кусков руды в зависимости от модуля упругости материала, что позволяет учитывать данный фактор при математическом моделировании напряженно-деформированного состояния кусков руды различного размера при дроблении.

4. Разработана математическая модель процесса дезинтеграции руды в слое частиц на основе метода конечных элементов с применением контактной задачи теории упругости, позволяющая получить качественную и количественную картину напряженно-деформированного состояния и потенциальной энергии деформации кусков руды в процессе воздействия на них внешних силовых факторов.

5. Моделирование внешней нагрузки со стороны валков на слой породы в роллер-прессе, в виде момента вращения и сжимающей осевой силы, с применением специального конечного элемента типа «жесткая вставка», а так же использованием определенного вида граничных условий кинематического закрепления полностью согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе.

6. Предложено определять гранулометрическую характеристику дробленной породы в слое частиц под давлением, используя эмпирическую теорию дробления Бонда, где работа внешних сил в виде осевой сжимающей силы и момента

приравнивается к величине потенциальной энергии деформации породы, согласно закону сохранения энергии. Установлено, что данная зависимость, определяемая теоретически, с высокой точностью согласуется с приведенными в работе экспериментальными параметрами реального разрушения образцов при различном уровне энергетических затрат.

7. Результаты анализа картины напряженно-деформированного и энергетического состояния горной породы в роллер-прессе показывают, что применение метода конечных элементов, реализующего контактную задачу теории упругости, позволило выявить характер взаимодействия кусков руды в процессе дробления, а именно: впервые был установлен механизм разрушения руды в слое частиц под давлением, основой которого является градиент нормальных напряжений, вызывающий максимальные касательные напряжения.

8. Серия проведенных полупромышленных исследований на медной руде месторождения Нурказган подтвердила адекватность предложенной методологии оценки основных технологических параметров дезинтеграции горных пород в слое частиц под давлением, реализуемой с использованием разработанной математической модели.

9. Экспериментально доказано, что с помощью модели МКЭ и контактной задачи теории упругости твердых тел, а также эмпирической теории дробления Бонда возможно прогнозировать гранулометрическую характеристику продукта разрушения руды в слое частиц под давлением. Выполнен прогноз гранулометрических характеристик для месторождений «Западное», «Нурказган», «Васильковское». Оптимизированы осевые усилия и крутящий момент для роллер-прессов, установленных на обогатительных фабриках этих месторождений.

10. Внедрение разработанной методологии определения технологических параметров дезинтеграции руды в слое частиц позволило сократить объем полупромышленных испытаний при проектировании технологических схем тонкого дробления горно-обогатительных комбинатов «Нурказган» и «Васильковский». Ожидаемый экономический эффект от применения методологии определения основных технологических параметров дезинтеграции руды в слое частиц под давлением составил, соответственно, 1757 тыс. руб. и 5053 тыс. руб. Данная методология позволяет сократить сроки выхода на проектные технологические показатели на 2.2 месяца при вводе в эксплуатацию ГОКа «Васильковский», расчетный экономический эффект составил 39600 тыс. руб. Проектирование узла объемного разрушения руды в валковом прессе на ГОКе «Западный», с использованием методологии определения основных технологических параметров дезинтеграции, позволило получить реальный экономический эффект в объеме 8540 тыс. руб.

Основные положения и научные результаты опубликованы в следующих работах.

Монографии:

Федотов П.К. Разрушение руды в роллер-прессе. - М.: «Геоинформарк», 2006.– 128 с.

Федотов П.К. Межчастичное разрушение руды. - М.: «Геоинформарк», 2011.– 160 с.

Патенты:

Патент РФ № 2288036. Валковая дробилка/ Федотов П.К., Байбородин Б. А.; зарегистрировано 27.11.2006г.

Статьи, опубликованные в журналах рекомендованных ВАК:

Федотов П.К., Потёмкин А.А., Сенченко А.Е. К проблеме извлечения золота из песков техногенных россыпных месторождений // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. Специальный выпуск.- Сентябрь 2003. - С.60-67.

Федотов П.К. Разрушение материала в валковых мельницах высокого давления // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: Изд-во МГГУ, 2004.- № 11 -С.315-319.

Федотов П.К. Процессы образования микротрещин – основа объёмного разрушения руды // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: Изд-во МГГУ, 2010.- № 10 -С.392-395.

Федотов П.К. Численное моделирование процесса дробления породы в слое между прокатными валками под давлением // Современные технологии, системный анализ, моделирование, № 3(35), изд-во Иркутский государственный университет путей сообщения, 2012. - № 3. –С.21-27.

Федотов П.К. Разрушение руды в роллер-прессе // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: Изд-во МГГУ, 2013.- № 1. -С.193-204.

Федотов П.К. Методика определения осевой силы давления при разрушении в роллер-прессе // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: Изд-во МГГУ, 2013.- № 2 -С.225-228.

Федотов П.К. Основная причина снижения энергопотребления при разрушении руды в роллер-прессе // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: Изд-во МГГУ, 2013.- № 3 -С.309-314.

Федотов П.К. Эффективность разрушения руды с использованием традиционной технологии рудоподготовки в сравнении с применением объёмного разрушения руды // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: Изд-во МГГУ, 2013.- № 4 -С.309-318.

Федотов П.К. Сравнение эффективности дезинтеграции руды в слое частиц и с применением традиционных аппаратов// Цветные металлы, - М.: Издательство «Руда и Металлы», 2013.- № 5 - С.19-23

Федотов П. К. Численное моделирование граничных условий и нагрузки в анализе напряженно-деформированного состояния породы в процессе её дробления между валками в роллер-прессе // Современные технологии, системный анализ, моделирование, изд-во Иркутский государственный университет путей сообщения, 2014. - № 4. –С.27-33.

Федотов П. К. Моделирование основных параметров дезинтеграции руды в слое частиц под давлением // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: Изд-во МГГУ, 2014.- № 4 -С.226-231.

Федотов П.К. Анализ гранулометрической характеристики продукта разрушения образцов породы относительно их напряженно-деформированного состояния при дезинтеграции в поршневом прессе // Вестник ИрГТУ, Изд-во ИрГТУ, 2014 г. - № 11.

Федотов П.К. Эмпирическая зависимость предела прочности горных пород от размеров их кусков при дезинтеграции в поршневом прессе // Вестник ИрГТУ, Изд-во ИрГТУ, 2014 г. - № 12.

Статьи в журналах SCOPUS:

Федотов П. К. Моделирование процесса разрушения руды в слое частиц под давлением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, Новосибирск, 2014. - № 4.

Зарубежные публикации:

Fedotov P., Fedotov K. Practical Experience Gathered with a Roller Press set up in the Gold Deposit „Zapadnoye“ // Symposium of Minerals Engineering, Australia, 2004.

Федотов П.К. Опыт использования роллер-пресса на месторождении Западное // Международный горно-обогатительный конгресс IMPC XXIV, Пекин, 24-28 сентября 2008 г.

Федотов П.К. Механизм разрушения руды в роллер-прессе // Международный горно-обогатительный конгресс IMPC XXVI, Индия, Дели, 24-28 сентября 2012 г.

Федотов П.К. Моделирование гранулометрической характеристики продукта разрушения руды в слое частиц // Международный горно-обогатительный конгресс IMPC XXVII, Чили, Сантьяго, 20-24 октября 2014 г.

Материалы международных, всероссийских и региональных конференций:

Федотов П.К. Снижение потребления энергии при использовании роллер-пресса /П.К. Федотов, Б.А. Байборodin //Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения): Материалы международного совещания. – СПб.: Роза мира, 2005. – 383 с.

Федотов П.К. Применение МКЭ для создания модели напряженного состояния образцов горной породы /П.К. Федотов // Современные проблемы комплексной пе-

переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения): Материалы международного совещания. – СПб.: Роза мира, 2005. – С.196–198.

Федотов П.К. Целесообразность применения роллер-пресса в процессе рудо-подготовки /П.К. Федотов //IV Конгресс обогатителей стран СНГ. Материалы конгресса. – М.: Альтекс, 2003. – С.50–51.

Федотов П.К. Дезинтеграция горных пород /П.К. Федотов // Современные методы переработки минерального сырья: Материалы Общероссийской научн.-практ. конф., 12–15 ноября 2003 г.– Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – С.27–32.

Федотов П.К. Полупромышленные испытания валковой мельницы высокого давления /П.К. Федотов //Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки (Плаксинские чтения): Материалы международного совещания, г. Иркутск, 13-17 сентября 2004г. – М.: Альтекс, 2004. – 179 с.

Федотов П.К. Применение MSC/NASTRAN для создания модели разрушения руды в слое материала /П.К. Федотов // Перспективы развития технологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств: Материалы докл. науч.-практ. конф., посвященной памяти С.Б. Леонова, 28–29 апреля 2004 г. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – С.11–12.

Федотов П.К. Разрушение руды на роллер-прессе /П.К. Федотов // Тез. док. науч.-практ. конф. «Пути решения актуальных проблем добычи и переработки полезных ископаемых». – Якутск: Изд-во ЯГУ, 2003. – С. 88–90.

Федотов П.К. Разупрочнение руд перед измельчением /П.К. Федотов // Тез. док. международного совещания «Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых», г. Петрозаводск. – М.: Альтекс, 2003. – С. 31–32.

Федотов П.К. Моделирование процесса разрушения породы в роллер-прессе / П.К. Федотов, К.В. Федотов // V Конгресс обогатителей стран СНГ: Сборник материалов. – М.: Альтекс, 2005. – С.76–78.

Федотов П.К. Энергосбережение при использовании валковых мельниц высокого давления / П.К. Федотов // Международная научно-практическая конференция “Энергосберегающие технологии, методы повышения эффективности работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения” ИрГТУ, 2003 г. : Сборник материалов. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, – С. 32-34.

Федотов П.К. Использование роллер пресса на золотоизвлекательной фабрике месторождения «Западное» / П.К. Федотов // Материалы международного совещания Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и

нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки (Плаксинские чтения), г. Иркутск, 13-17 сентября 2004 г.: Материалы международного совещания. – СПб.: Роза мира, 2004 – С. 23-24.

Федотов П.К. Опытнo-промышленные испытания роллер пресса для внедрения на обогатительной фабрике рудника «Нурказган» / П.К. Федотов // VI Конгресс обогатителей стран СНГ 28-30 марта, г. Москва, 2007 г. : Сборник материалов. – М.: Альтекс, 2007. – С.73–74.

Федотов П.К. Моделирование процесса межчастичного измельчения в поршневом прессе / П.К, Федотов // Современные проблемы обогащения и глубокой комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения): Материалы международного совещания. Владивосток, 16-21 сентября 2008 г. - Владивосток: 2008. – С. 33-34.

Федотов П.К. Оптимизация процесса выбора роллер пресса для промышленных объемов / П.К. Федотов // VII Конгресса обогатителей стран СНГ 02-04 марта, г. Москва, 2009 г. - Материалы конгресса. – М.: Альтекс, 2009. – С.49–50.

Федотов П.К. Эволюция валковых мельниц высокого давления /П.К. Федотов// VIII Конгресса обогатителей стран СНГ 01-03 марта, г. Москва, 2011 г.- Материалы конгресса. – М.: Альтекс, 2011. – С. 60–61.

Федотов П.К. Современные способы дезинтеграции руды для золотодобывающих предприятий / П.К. Федотов // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья : материалы Международного совещания ["Плаксинские чтения - 2012", г. Петрозаводск] (10-14 сентября 2012 г.) / Российская Акад. Наук, Отд-ние наук о Земле [др.]. - Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2012. - 397 с.

Федотов П. К. Процесс разрушения руды в роллер прессах / П.К, Федотов // Информационно-аналитический журнал Золото и технологии, Москва, № 3, сентябрь, 2012 г. – С. 25-27.

Федотов П.К Изучение энергоемкости процесса межчастичного разрушения руды / П.К. Федотов // Международное совещание «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья» «Плаксинские чтения – 2013», г. Томск 16-19 сентября 2013 г.

Федотов П.К Учет масштабного фактора при дезинтеграции руд/П.К.Федотов // Материалы XIX Международной научно-технической конференции " Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья": 23-24 апрель 2014 г. – С. 35-36.