

Проблемы рудоподготовки в «четвертой промышленной революции»

Хопунов Э. А.¹

¹ Консультационно-аналитический центр «Российский стандарт», г. Екатеринбург, Россия
e-mail: hopunov@gmail.com

Реферат

Целью работы является анализ проблем горно-перерабатывающей отрасли на начальном этапе текущей «четвертой промышленной революции». Отмечено, что тотальная цифровизация и роботизация технологических процессов не избавит отрасль от избыточного энерго- и водопотребления до тех пор, пока не будут решены базовые проблемы нерационального расходования указанных ресурсов. Принимая во внимание, что смена поколений технологий сопровождается сменой парадигмы, автор предложил концепцию новой парадигмы.

Методология анализа обусловлена содержанием парадигмы технологии добычи и переработки минерального сырья. Сформулирован «идеальный конечный результат», достигнуть которого можно, следуя принципам: не добывать, не дробить и не обогащать ничего лишнего. В работе поставлены задачи разработки новых технологий и оборудования для достижения качественно иных показателей рудоподготовки.

Результаты анализа новой парадигмы основываются на принципах избирательности, по которым промежуточные и конечные продукты рудоподготовки предполагается формировать в результате последовательных циклов преобразования структурных элементов разделения в структурные элементы раскрытия. Поскольку при обычном измельчении вновь образованная поверхность гораздо (в десятки раз) выше поверхности срастания, сокращение объема материала при селективном разрушении позволит в разы снизить энергопотребление на раскрытие.

Областью применения рассматриваемой концепции является вся горно-перерабатывающая отрасль, поскольку практически все крупные недропользователи применяют одинаковый цикл рудоподготовки: взрывная отбойка–дробление–раскрытие–обогащение.

Ключевые слова: *рудоподготовка; смена поколений технологий; селективное разрушение; ресурсосбережение.*

Цель работы – анализ проблем горно-перерабатывающей отрасли на начальном этапе текущей «четвертой промышленной революции». Одной из причин отставания от общего тренда встраивания в новый технологический уклад является недостаточная поддержка фундаментальной наукой технологий переработки минерального сырья. Во многом это связано с большим диапазоном (почти девять порядков 10^4 – 10^{-5} м) размерного ряда объектов, относящихся к разным наукам о Земле. Нельзя сказать, что «четвертая промышленная революция» обошла стороной отрасли, связанные с добычей и переработкой минерального сырья. В основном изменения связаны с внедрением программных средств для количественного описания месторождений, построения 3D-карт залегания руд, геофизических данных разведки. Появились программные продукты, позволяющие достаточно быстро обрабатывать большие массивы данных о составе и структуре руд. Вместе с тем тотальная цифровизация и роботизация технологических процессов не избавит отрасль от избыточного энерго- и водопотребления до тех пор, пока

не будут решены базовые проблемы нерационального расходования указанных ресурсов. Актуализация рассматриваемой проблемы вызвана тем, что «реальный вклад недропользования в ВВП России с учетом всех бизнес-процессов (транспортировка полезных ископаемых, энергоснабжение, производство материальных ресурсов и т. д.), связанных с добычей полезных ископаемых, достигает 50–60 %» [1]. Переход отрасли в новый технологический уклад помогает также решать задачи стратегической безопасности по обеспечению минерально-сырьевой базы в условиях постоянного истощения минеральных ресурсов. Предыдущий этап технологической революции не решил задачи рационального недропользования, а возникший вследствие этого незаполненный «технологический разрыв» существенно увеличил риски отставания отрасли. Обычно подготовка к смене поколений техники и технологий происходит задолго до того, как произойдет исчерпание потенциала развития действующих систем: верхний участок S-кривой жизненного цикла [2–6].

Методология анализа обусловлена содержанием парадигмы технологии добычи и переработки минерального сырья, которая, сохраняя преемственность, основывается на базовых принципах ресурсосбережения: не добывать, не дробить и не обогащать ничего лишнего. Полноценное соблюдение указанных принципов возможно лишь с применением технологий и оборудования, основанных на иных принципах, с более высокими показателями переработки минерального сырья. В теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) существует понятие «идеальный конечный результат» [7]. Для процессов добычи и переработки минерального сырья можно обозначить следующие «идеальные конечные результаты»:

- потребление энергии, воды и других используемых ресурсов соответствует физически обоснованным уровням (необходимым и достаточным);
- использование минерального сырья, содержащегося в разрабатываемом месторождении, приближается к максимуму (в идеале к 100 %);
- установлено оптимальное соотношение между полнотой извлечения минеральных компонентов, затратами всех ресурсов (финансовых, энергетических, водных и др.) и динамикой цен на металлы и минеральное сырье.

Для того чтобы достичь указанных результатов, необходимо как минимум решить ряд научных, конструкторских и технологических задач:

- разработать новые технологии взрывной отбойки, использующие волновые эффекты для избирательного разупрочнения текстурно-структурных неоднородностей взрываемого массива;
- разработать сквозную модель энергопотребления в процессах добычи и переработки минерального сырья;
- создать новые устройства, способные адаптивно изменять параметры деформирования в зависимости от меняющихся свойств объектов разрушения (в том числе и в процессе дезинтеграции);
- разработать технику для разрушения руд с избирательным выводом раскрытых на данной стадии продуктов (в том числе и модульную);
- создать модульные устройства для «сухого» разделения минеральных компонентов, сопрягаемые с каждой стадией разрушения.

Необходимость создания сквозной модели энергопотребления по всему циклу *добыча–переработка* обусловлена тем, что разрушение, обезвоживание и сушка концентрата относятся к процессам с наибольшим потреблением энергии. При этом потребление энергии на раскрытие зависит от энергии, затраченной на взрывание, а затраты на обезвоживание и сушку зависят от степени измельчения (т. е. от затрат энергии на разрушение).

Возможные варианты ресурсосберегающих моделей:

- модель суммарного энергопотребления в процессах добычи (химический эквивалент энергии взрыва переводится в кВт), измельчения, обезвоживания, сушки и утилизации отходов (хвостов, шламов и др.);
- стоимостная (экономическая) модель.

Экономическая модель призвана учитывать все затраты, полноту извлечения, степень комплексности добычи и использования всего минерального сырья данного месторождения. Для управления процессами получения товарных продуктов в зависимости от меняющейся конъюнктуры рынка в стоимостной модели необходимо рассматривать три сценария: текущий, оптимистический и пессимистический (для разных уровней рисков).

Базисом для постановки целей и задач рассматриваемой парадигмы служили следующие научные положения:

- теория волновых процессов в многокомпонентных твердых телах (горные породы, минеральные комплексы и т. п.), вызванных взрывом и иными видами динамического воздействия;
- теории сложноподпряженного состояния горных пород при дезинтеграции руд на разделяемые минералы и комплексы;
- теории разделения материалов в соответствии с контрастом свойств, выявленных по петрофизическим характеристикам;
- закономерности разрушения с одновременным разделением в пространстве фрагментов с разными свойствами.

Результаты анализа новой парадигмы поставили под сомнение неизбежность сплошного измельчения в голове процесса, превращающего руду в продукт размером в десятки (сотни) микрометров, с избыточными затратами энергии. Предлагаемая парадигма основывается на принципах избирательности, учитывающих текстурно-структурную иерархию руд, изменение технологических характеристик сырья, дисперсию параметров и их изменение в процессах переработки. Промежуточные и конечные продукты рудоподготовки предполагается формировать в результате последовательных циклов преобразования структурных элементов разделения в структурные элементы раскрытия [8, рис. 1.1]. В качестве первичных структурных элементов разделения используются продукты взрывного разрушения. На последующих стадиях селективному разрушению подвергаются только те срастания, минералы которых подлежат разделению на данной стадии рудоподготовки. В этом отношении физически неверно отождествлять измельчение и раскрытие при селективном разрушении, принципиальное отличие которых состоит в целях и методах их достижения. Цель измельчения – максимальный выход заданных классов крупности, который достигается многократным сокращением размера исходного продукта и увеличением вновь образованной поверхности. Цель селективного разрушения – раскрыть извлекаемые минералы (минеральные комплексы) в естественной крупности для последующего концентрирования. Теоретические затраты энергии на раскрытие можно сопоставлять с фактическими только при селективном разрушении, когда вновь образованная поверхность мало отличается от поверхности срастания разделяемых минералов. Селективное разрушение не предполагает разрушение руды до размера извлекаемого минерала с образованием избыточной вновь образованной поверхности. Поскольку при обычном измельчении вновь образованная поверхность гораздо (в десятки раз) больше поверхности срастания, сокращение объема материала при селективном разрушении позволяет в разы снизить энергопотребление на раскрытие. Поэтому потребление энергии при измельчении в несколько десятков кВт · ч/т нельзя признать физически обоснованным. Расчеты показывают, что при рациональной рудоподготовке энергопотребление должно быть на порядок

ниже (даже с учетом всех потерь). Анализ низкой эффективности раскрытия минералов выявил множество неустраняемых факторов избыточного энергопотребления при измельчении руд на традиционных устройствах [8]. Экспериментально доказано, что энергия и усилие разрушения уменьшаются с уменьшением размеров частиц, в то время как спектр сил и энергии воздействия в мельницах остается неизменным. Связь энергии и разрушающего усилия с размером частиц d имеет вид: $A \approx kd^{n+1}\varepsilon(d)/2$ и $F = kd^n$ (k – коэффициент размерности, показатель n зависит от свойств разрушаемых минералов, $\varepsilon(d)$ – деформация частиц). На фоне снижения прочности частиц необходимо учитывать степенной характер увеличения числа вновь образованных фрагментов при измельчении. Превышение темпов роста числа частиц (на порядки) относительно параметров снижения прочности приводит к суммарному росту энергопотребления при сокращении размера, даже без учета увеличения потерь на аморфизацию, агрегирование, различного рода излучения и неэффективную передачу разрушающих усилий [8].

В дробилке (например, щековой) по пику потребляемой активной мощности на счетчике (или по импульсу тока) можно идентифицировать затраты энергии на разрушение, в отличие от мельницы, у которой по прибору учета энергии, установленному на приводе, сделать это невозможно. Диаграмма потребляемой энергии на счетчике активной мощности мельницы практически (с учетом колебаний массы руды на входе и уменьшения массы шаров за счет износа) «не заметит» разницы: происходит ли разрушение руды или она «транзитом» проходит через барабан. Основными индикаторами факта разрушения руды в мельнице являются: длительность процесса и разница содержания классов на входе и на выходе.

В рудоподготовке из всех методов нагружения наиболее интенсивное воздействие на руду оказывает взрыв. Встраиванию взрывной отбойки в общую картину энергосбережения может помочь конвергенция наук о Земле: геологии, геофизики (разведка и описание месторождения); геотехнологии, геомеханики (формирование горной массы), минералургии (рудоподготовка, обогащение полезных ископаемых, извлечение) [9]. Исследования связи обогатимости руд с показателями буримости и взрываемости горных пород показали, что рудоподготовку целесообразно начинать со стадии взрывной отбойки [8]. Снижение энергозатрат на последующую дезинтеграцию руд при увеличении расхода взрывчатых веществ (ВВ) не вызывает сомнения [10]. Вопрос лишь в экономическом обосновании таких решений, поскольку энергозатраты на дробление и так имеют низкие значения. Отследить и однозначно подтвердить значимость влияния расхода ВВ на энергоемкие процессы измельчения достаточно сложно, поскольку эти изменения нивелируются увеличением содержания мелких классов, изменением структуры грансостава горной массы и применением разных типов мельниц. При стоимости химической энергии (ВВ) примерно в шесть раз выше стоимости электрической энергии [11] вопрос о роли ВВ в повышении эффективности дезинтеграции не столь очевиден, учитывая факторы непроизводительных энергозатрат при измельчении. Поскольку для некоторых типов руд удельные энергозатраты на буровзрывные работы соизмеримы с энергозатратами на дробление, инновации в буровзрывных работах необходимо искать в области технологий, повышающих эффективность передачи энергии ВВ разрушаемому массиву. Одним из таких направлений является селективное взрывание, основанное на различии акустического импеданса структур горных пород с разным составом минерального сырья (принципы и методы сейсморазведки). Представление естественной неоднородности взрываемого блока в виде иерархии структур с размерами d_1, d_2, \dots, d_j позволяет применить волновую теорию для неоднородных сред. В соответствии с этой теорией в неоднородном массиве горных пород можно ожидать формирование упругих волн различной длины $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j$, соизмери-

мых с размерами структурных неоднородностей. В широком амплитудно-частотном спектре ударных волн всегда «найдутся» частоты, совпадающие с частотой собственных колебаний элементов неоднородности в разрушаемом блоке. Тем самым могут быть созданы предпосылки для селективного разупрочнения руды за счет резонансного поглощения энергии упругих волн элементами структурных неоднородностей с разным акустическим импедансом. Технология взрывной отбойки должна соответствовать новым задачам и требованиям к конечному продукту взрывания. Задачи селективной технологии взрывания – получить горную массу в виде фрагментов, разрушенных по текстурной неоднородности с разными петрофизическими характеристиками, по которым их можно разделить на разные потоки уже на этом этапе рудоподготовки. Вторая задача – селективное разупрочнение структурных элементов для снижения энергозатрат на последующих стадиях раскрытия. Предпосылки для разработки селективных буровзрывных технологий на базе данных геолого-технологического картирования месторождения и параметров бурения скважин созданы предыдущими исследованиями [10–16]. Современная практика располагает множеством средств для обеспечения необходимых параметров взрыва: конструкция заряда (гирляндовые, шланговые), заряды с изменяющимися энергетическими свойствами по длине скважины, изменение интервала замедления и порядка инициирования контурных зарядов, применение электрических детонаторов с электронным взрывателем и др. Возникновение собственных колебаний на неоднородностях структуры разрушаемого блока доказано авторами работ [14, 15]. Тесная связь показателей геологической и физической неоднородности массива горных пород открывает возможности для совмещения моделей геоинформационных систем и технологических моделей рудоподготовки, например через показатели энергоемкости бурения. Сквозная модель энергопотребления призвана оптимизировать распределение энергоресурсов по переделам рудоподготовки.

В работе [16] справедливо отмечено, что рудоподготовка на базе «сухих» методов разрушения и сепарации, является очевидным путем снижения водопотребления. Предел дезинтеграции сухими методами определяется экономической целесообразностью применения механического разрушения на конечных стадиях формирования структурных элементов раскрытия руд со сложной структурой сростания. Использование «мокрых» методов обогащения необходимо рассматривать как предельную ситуацию в случае недостаточного контраста разделительного признака для сухих методов сепарации и раскрытия. Предлагаемая декомпозиция «процесса измельчения» на циклы *сухое разрушение–сепарация после каждой стадии* позволит уменьшить долю переработки в мокрых переделах (если в них возникнет необходимость). При этом необходимо учитывать, что показатели обогащенного продукта определяет потребитель (металлурги, химики и др.). Так, требования к железорудному концентрату для агломерата и окатышей существенно отличаются как по содержанию железа, так и по гранулометрическому составу.

Постановка задачи снижения водопотребления открывает новые возможности развития сухих методов сепарации и разработки соответствующих устройств. Большие перспективы в этом плане у методов радиометрической сепарации, имеющих широкий спектр средств возбуждения и анализа отклика: рентгенометрические, фотометрические, рентгенолюминесцентные, гамма-радиометрические и т. п. Сочетание радиометрических методов, современных методов распознавания образов (обработка многомерных сигналов нейросетевыми технологиями) с методами вибрационного взвешивания частиц в пространстве позволит подойти к решению задачи снижения крупности разделения данными методами и увеличения производительности инновационных устройств.

Областью применения рассматриваемой парадигмы является вся горно-перерабатывающая отрасль, поскольку практически все крупные недропользователи применяют одинаковый цикл рудоподготовки: *взрывная отбойка–дробление–раскрытие–обогащение*. Реализация поставленных задач требует не только инновационных технологий и принципиально нового оборудования, но и значительных финансовых ресурсов. На этапе инноваций с наибольшим уровнем рисков (НИОКР, разработка и испытание опытных образцов и т. п.) вопрос об инвесторе является ключевым.

Инвестирование рассматриваемых тем осложнено следующими факторами:

– отсутствие единой комплексной программы работ с указанием требований к конкурентоспособному оборудованию и технологиям, с указанием участников каждого этапа процесса, с указанием заказчиков и потребителей разработок, источников финансирования, сроков и т. п.;

– отсутствие запроса на НИОКР у предприятий недропользователей для решения межотраслевых задач;

– отсутствие координации между различными отраслями наук о Земле, каждая из которых развивается внутри себя, ставя свои цели и решая свои задачи, без оглядки на эффективность недропользования в качестве конечного результата, имеющего межотраслевой характер;

– согласно утверждению авторов [1], «за истекшие десятилетия утеряна производственная база, научные и конструкторские школы по разработке и изготовлению горно-обогатительного оборудования».

Не «очень высокую» заинтересованность недропользователей в НИОКР, нежелание предприятий вкладываться в инновации можно объяснить издержками стратегического планирования и погружением в решение текущих финансово-экономических проблем [1]. Можно согласиться с точкой зрения авторов, что у предприятий отсутствует внутренняя мотивация, как у потребителей, так и у производителей указанного оборудования. Ориентир потребителей на импортное оборудование авторы связывают с недальновидностью и непониманием ситуации, особенно в условиях непрерывных санкций. Структура инвестиций недропользователя в проекты технологического обновления такова, что основная их доля направлена на расширение минерально-сырьевой базы, на освоение новых месторождений. Инвестировать разработки на стадиях максимальных рисков недропользователь не готов. Об этом свидетельствуют программы развития горно-перерабатывающей промышленности, представленные некоммерческим партнерством «Технологическая платформа твердых полезных ископаемых», где в качестве основных источников финансирования НИОКР рассматриваются целевые программы государственной поддержки. Однако расчет только на программы государственного финансирования вряд ли позволит приблизиться к решению даже части проблем, представленных в этих планах. Масштаб, комплексность и межотраслевой характер поставленных задач не позволяет решать их без финансового участия недропользователей и промышленных предприятий, без координации государственными структурами всего цикла работ по стратегическому развитию горно-перерабатывающей отрасли. Инвесторами данного проекта могут быть недропользователи, машиностроительные предприятия, собственник недр (государство) и иные финансовые институты.

Следует отметить, что Урал является тем регионом, в котором как нигде сконцентрированы проблемы и возможности рационального недропользования. Множество предприятий, занимающихся разведкой, добычей и переработкой минерального сырья, профильные академические институты, возрождающееся машиностроение имеют все предпосылки для решения поставленных задач. Институты УрО РАН, образовательные учреждения (УГГУ, Технический универ-

ситет УГМК, УрФУ) в координации с отраслевыми институтами в состоянии выполнить необходимый объем фундаментальных и прикладных исследований. Машиностроительные предприятия региона способны обеспечить разработку, создание и выпуск нового оборудования. Конверсия предприятий ВПК открывает дополнительные возможности для организации производства наукоемкого технологического оборудования, которое будет не копировать даже самые лучшие импортные образцы, а выпускать принципиально новую технику. Схемы некоторых конструкций для разработки приведены в работе [8]. При разработке оборудования на уровне «пионерских изобретений» использование приемов и алгоритмов решения изобретательских задач (АРИЗ) позволит значительно сократить время на поиск наилучших решений, базирующихся на применении широкого спектра различных физических явлений. Тем более что современные IT-технологии открывают новые возможности широкого применения ТРИЗ и АРИЗ в различных областях техники и технологий [7].

Очевидно, что ни один, даже крупный недропользователь (УГМК, ЕВРАЗ, НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ, МЕТАЛЛОИНВЕСТ и др.), не в состоянии в одиночку инвестировать НИОКР и координировать, например, разработку технологий избирательной взрывной отбойки или создание нового оборудования. Потребуется организационная структура-интегратор (условно – *Межотраслевой центр разработки техники и технологий для добычи и переработки минерального сырья*), которая будет обеспечивать, планировать и координировать весь цикл работ: НИОКР, создание опытных и серийных образцов, внедрение и сопровождение новых технологий. Новой структуре предстоит на базе изложенной концепции сформировать инновационный проект «Новый технологический уклад в горном деле» и в рамках проектного управления обеспечить его реализацию, в том числе и возможность включения в целевые государственные программы. Инициаторами и учредителями *Межотраслевого центра...* могут стать государственные структуры (собственник недр, УрФО), НИИ, вузы, машиностроительные предприятия, предприятия-недропользователи, НПО и др.

Обработку некоторых элементов новой парадигмы можно начать, не дожидаясь комплексных инновационных решений. Например, поиск параметров взрывания для селективного разупрочнения горных пород за счет резонансных явлений и волновых процессов, исследование процесса декомпозиции измельчения на циклы *сухое разрушение–разделение* в паре дробилка и сепаратор – достойные темы магистерских работ. В ожидании, что идея инноваций в горном деле «овладеет массами и сама пойдет», можно в очередной раз посмотреть вслед мимо уходящему витку технологического развития и вновь уповать на зарубежные рынки технологий и оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Твердов А. А., Никишичев С. Б., Захаров В. Н. Проблемы и перспективы импортозамещения в горной отрасли // Горная промышленность. 2015. № 5 (123). С. 54–58.
2. Яницкий О. Н. Четвертая научно-техническая революция и глубинные изменения процессов глобализации // Вестник института социологии. 2017. Т. 8. № 2. С. 13–33.
3. Zartha W. S. Curve analysis and technology life cycle // Espacios. 2016. Vol. 37. No. 7. P. 1–19.
4. Dube C., Gumbo V. Diffusion of innovation and the technology adoption curve: where are we? // Business and Management Studies. 2017. Vol. 3. No. 3. P. 34–52.
5. Hall B. H., Khan B. Adoption of new technology // New Economy Handbook: Hall and Khan. 2002. P. 1–38.
6. Christensen C. M. Exploring the limits of the technology s-curve. Part 1: Component technologies // Production and Operations management. 1992. Vol. 1. No. 4. P. 334–357.
7. Альтшуллер Г. С. Творчество как точная наука. Петрозаводск: Скандинавия, 2004. 208 с.
8. Хопунов Э. А. Основы дезинтеграции руд и техногенных материалов. М.: РУСАЙНС, 2016. 474 с.
9. Хопунов Э. А. Конвергенция технологий переработки минерального сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 4. С. 131–139.

10. Демидюк Г. П., Викторов С. Д., Фугзан М. М. Влияние взрывного нагружения на эффективность последующих этапов обогащения // Взрывное дело. 1986. № 89/46. С. 116–120.
11. Симаков Д. Б. Обоснование рациональной степени дробления в технологических процессах на карьерах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2007. 17 с.
12. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 232 с.
13. Жариков С. Н. Зависимость энергоемкости взрывания горных пород от энергоемкости их бурения // Горный журнал. 2009. № 6. С. 60–62.
14. Нагорный В. П., Денисюк И. И., Швейкина Т. А., Лихван В. М. Определение частоты собственных колебаний разрушаемого блока горного массива // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 6. С. 147–150.
15. Серяков В. М., Волченко Г. Н., Серяков А. В. Геомеханическое обоснование схем отбойки рудных блоков, учитывающих перераспределение статического поля напряжений при короткозамедленном взрывании // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2005. № 1. С. 46–52.
16. Арсентьев В. А., Вайсберг Л. А., Устинов И. Д. Направления создания маловодных технологий и аппаратов для обогащения тонкоизмельченного минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 5. С. 3–9.

Поступила в редакцию 31 января 2019 года

Сведения об авторах:

Хопунов Эдуард Афанасьевич – доктор технических наук, консультант Консультационно-аналитического центра «Российский стандарт». E-mail: hopunov@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-54-62

Problems of ore preparation in the “fourth industrial revolution”

Eduard A. Khopunov¹

¹ Advisory and Analytical Centre “Russian Standard”, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aims to analyze the problems of the mining industry at the initial stage of the current “fourth industrial revolution”. It is noted that the total digitalization and robotization of technological processes will not save the industry from excessive energy and water consumption until the basic problems of the irrational use of these resources are resolved. Taking into account that the change of generations of technology is accompanied by a paradigm shift, the concept of a new paradigm is presented.

The methodology of the analysis is determined by the content of the paradigm of technology for the extraction and processing of mineral raw materials. An “ideal final result” has been formulated, which meets the principles: do not extract, crush or enrich anything superfluous. In this paper, the tasks are set in terms of the development of new technology and equipment to achieve qualitatively different indicators of ore preparation.

The results of the new paradigm analysis are based on selectivity principles, according to which intermediate and final products of ore preparation are supposed to be formed as a result of successive cycles of transformation of division structural elements into disclosure structural elements. Since, with ordinary grinding, the newly formed surface is much (tens of times) higher than the surface of the accretion, the reduction in the volume of the material during selective destruction will make it possible to reduce the energy consumption per opening by several times.

The scope of the concept under consideration is the entire mining and processing industry, since practically all large subsoil users use the same ore preparation cycle: explosive blasting–crushing–opening–enrichment.

Key words: ore preparation; change of generations of technologies; selective destruction; resource saving.

REFERENCES

1. Tverdov A. A., Nikishichev S. B., Zakharov V. N. Problems and prospects of import substitution in the mining sector. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry Journal*. 2015; 5 (123): 54–58. (In Russ.)
2. Ianitskii O. N. The fourth technological revolution and deep shifts in globalization processes. *Vestnik instituta sotsiologii = Bulletin of the Institute of Sociology*. 2017; 8 (2): 13–33. (In Russ.)
3. Zartha W. S. Curve analysis and technology life cycle. *Espacios*. 2016; 37 (7): 1–19.
4. Dube C., Gumbo V. Diffusion of innovation and the technology adoption curve: where are we? *Business and Management Studies*. 2017; 3 (3): 34–52.
5. Hall B. H., Khan B. Adoption of new technology. In: *New Economy Handbook: Hall and Khan*. 2002: 1–38.
6. Christensen C. M. Exploring the limits of the technology s-curve. Part 1: Component technologies. *Production and Operations management*. 1992; 1 (4): 334–357.

7. Altshuller G. S. *Art as an exact science*. Petrozavodsk: Skandinaviia Publishing; 2004. (In Russ.)
8. Khopunov E. A. *The fundamentals of ore and technogenic materials disintegration*. Moscow: RUSAINS Publishing; 2016. (In Russ.)
9. Khopunov E. A. Mineral raw material processing technologies convergence. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 4: 131–139. (In Russ.)
10. Demidiuk G. P., Viktorov S. D., Fugzan M. M. The influence of explosive loading on the effectiveness of successive stages of dressing. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 1986; 89/46: 116–120. (In Russ.)
11. Simakov D. B. *Substantiation of rational fragmentation in processes at open pits. PhD in Engineering abstract of dissertation*. Magnitogorsk; 2007. (In Russ.)
12. Tangaev I. A. *Energy intensity of mining processes and mineral processing*. Moscow: Nedra Publishing; 1986. (In Russ.)
13. Zharikov S. N. Dependence between the energy intensity of rock blasting and drilling energy intensity. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2009; 6: 60–62. (In Russ.)
14. Nagornyi V. P., Denisiuk I. I., Shveikina T. A., Likhvan V. M. Determination of the frequency of natural oscillations through the destroyed block of rock mass. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013; 6: 147–150. (In Russ.)
15. Seriaikov V. M., Volchenko G. N., Seriaikov A. V. Geomechanical substantiation of ore blocks breaking taking into account the redistribution of the static field of stresses under short-delay blasting. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2005; 1: 46–52. (In Russ.)
16. Arsentiev V. A., Vaisberg L. A., Ustinov I. D. Trends in development of low-water-consumption technologies and machines for finely ground mineral materials processing. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2014; 5: 3–9. (In Russ.)

Received 31 January 2019

Information about authors:

Eduard A. Khopunov – DSc (Engineering), adviser, Advisory and Analytical Centre “Russian Standard”.
E-mail: hopunov@gmail.com

Для цитирования: Хопунов Э. А. Проблемы рудоподготовки в «четвертой промышленной революции» // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 5. С. 54–62. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-54-62
For citation: Khopunov E. A. Problems of ore preparation in the “fourth industrial revolution”. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 5: 54–62 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-54-62