

ЭЛЕКТРОВЗРЫВНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД С ОДНОВРЕМЕННОЙ СЕПАРАЦИЕЙ ЧАСТИЦ ПО КРУПНОСТИ

В. С. Тесленко, В. И. Ростовцев *, К.А. Ломанович, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев

*Институт гидродинамики СО РАН,
г. Новосибирск, Россия*

** Институт горного дела СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Исследовалось влияние параметров взрыва при измельчении минерального сырья на примере медно-никелевых руд. Показано, что в среднем энергозатраты при электрическом взрывании находятся в пределах 5 – 50 Дж/г. Рассмотрены механизмы разрушения частичек при большой и малой электропроводности руды. Установлена возможность совмещения операций измельчения и сепарации частиц по крупности в одном аппарате.

Электровзрывная дезинтеграция, медно-никелевые руды, разделение по крупности, электрическая проводимость руд.

В последние десятилетия стало прогрессирующим ухудшение качества добываемых руд черных и цветных металлов, горно-химического сырья, что привело к снижению объемов добычи полезных ископаемых, к вовлечению в добычу и переработку труднообогатимого сырья, к росту стоимости обогащения полезных ископаемых, увеличению энергопотребления. Так, например, при измельчении руд до крупности 0,05–0,1 мм энергозатраты составляют 50-80 кВт·ч/т.

Отличительная черта большинства перспективных рудных месторождений и техногенного сырья – тонкозернистая структура и сложная текстура, субмикроскопические формы взаимосвязи слагающих их минералов, что не позволяет достаточно эффективно раскрыть их классическими методами дезинтеграции из состояния срастания. Такое положение особенно характерно для руд редких металлов, оловянных, циркониевых, золотосодержащих и некоторых других руд, при переработке которых потери достигают до 50%. По данным [1] 35-40% потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки связано со сростками и 30-35% – с тонкими частицами размером менее 40 мкм.

В этих условиях повышение полноты и комплексности обогащения минерального сырья, создание малоотходных, экологически безопасных энергосберегающих технологий приобретает первостепенное значение и определяет современную стратегию оценки месторождений, технологии их добычи и переработки. Основой при этом будут как современные методы обогащения, комбинации их, использующие новые физико-

химические и механохимические закономерности, так и нетрадиционные процессы, в т.ч. с использованием энергетических воздействий [1,2].

В [1] приведен обзор основных нетрадиционных энергетических методов дезинтеграции минеральных комплексов и показана их роль в процессах обогащения минерального сырья. Среди них отмечены: электрохимическая обработка, поток ускоренных электронов, СВЧ-обработка, электроимпульсная обработка, электрогидродинамическое воздействие, ударные волны, магнитно-импульсная обработка, мощные электромагнитные наносекундные импульсы. Значительный интерес и большие финансовые вложения зарубежных фирм в данные технологии указывают на их большую перспективность при селективной дезинтеграции тонковкрапленных минеральных комплексов (вплоть до наноразмеров).

Из вышеуказанных методов дезинтеграции минерального сырья существенные преимущества имеет метод воздействия наносекундными электромагнитными импульсами, так как при его использовании удастся снизить энергозатраты в 3-5 раз с одновременным повышением извлечения золота и серебра в продуктивные растворы и магний платиновые группы в концентраты. При этом отпадает необходимость использования обжига или автоклавной обработки. В тоже время при этом способе минимальный размер образца должен быть 100 мкм, влажность не должна превышать 30%, генератор импульсов должен быть защищен экраном [1].

Как показано в ряде работ максимальную долю вскрытия минералов по границе сростания дают растягивающие усилия, которые могут быть получены с использованием генерируемых разными способами гидроударных и кавитационных воздействий [1,3,4,5,6]. Одним из перспективных методов измельчения может быть электровзрывная дезинтеграция. Сущность этого способа состоит в том, что на минеральное сырье, находящееся в водной среде, воздействуют непосредственно электрическим разрядом. Основным фактором разрушения является электрический взрыв частицы; взрыв происходит внутри тела частички. При этом электрогидравлический эффект [7] и кавитационные процессы являются дополнительно сопутствующими процессами дробления для соседних частиц.

В настоящей работе приведены результаты по электровзрывной дезинтеграции минерального сырья на примере медно-никелевых руд. Предлагаемый метод при оптимизации разрядных цепей может стать менее энергетически затратным по сравнению с известными способами.

На рис.1 представлена принципиальная схема трехэтапного (трехуровневого) электровзрывного метода дробления Cu-Ni руды с одновременной сепарацией частиц по фракциям.

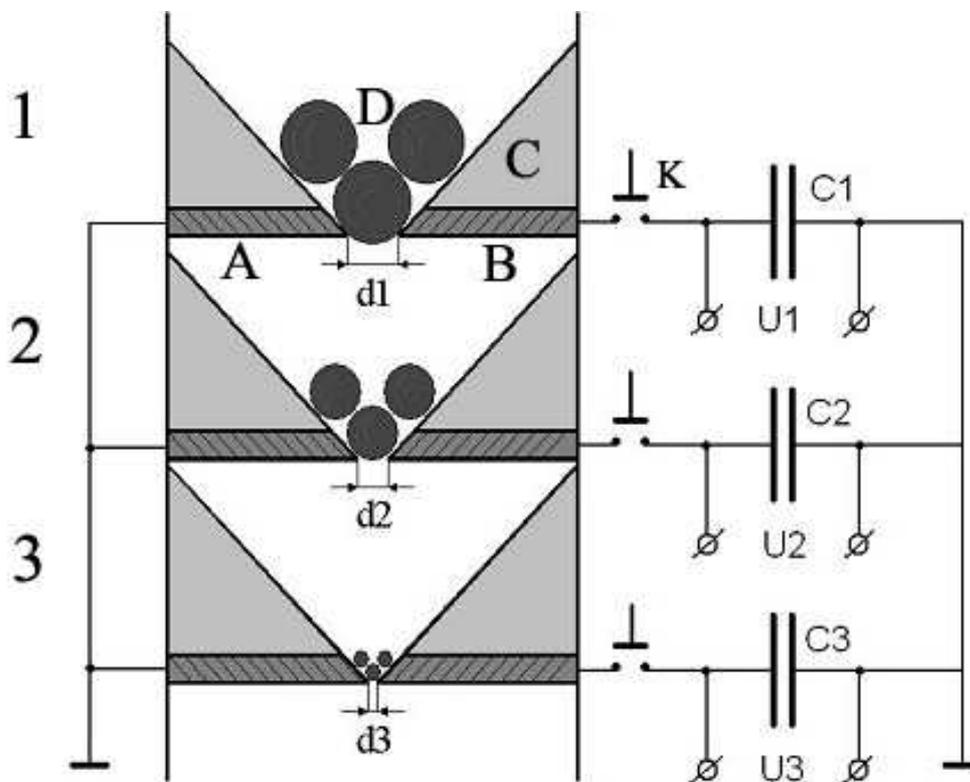


Рис.1. Схема трехуровневого электровзрывного сепаратора. А, В – электроды, С – диэлектрический бункер, D – рудная масса, К – коммутатор, C₁, C₂, C₃ – конденсаторные накопители.

Электрическое взрывание частиц производится между коническими электродами А, В, которые одновременно выполняют функцию дозаторов частиц. Разряды конденсаторов C₁, C₂, C₃, ... C_n могут осуществляться одновременно или последовательно на заданных уровнях. Электрическое взрывание частиц производится в воде, это важное условие необходимо для эффективного дробления и сохранения структурных свойств раздробленных частиц.

Электровзрывная дезинтеграция руды может начинаться с любой фракции руды, и дробление может осуществляться до необходимых размеров. Суть предлагаемого метода заключается в использовании свойства хорошей электропроводности Cu-Ni руды. Эта особенность позволяет осуществлять электрический взрыв частичек руды (возможно и блоков) на соответствующем уровне (1,2,3,...n) по размерам частиц путем установки зазоров между электродами ($d_1 > d_2 > d_3 > \dots > d_n$).

Предлагаемый электровзрывной метод опробован при дроблении частиц Cu-Ni руды фракции $-1+0,5$ мм на щелевых зазорах $d = 0,3 - 0,5$ мм, длина щели $l = 10$ мм. На рис.2 представлены результаты дробления исходной фракции при щелевом зазоре $d=0,5$ мм.

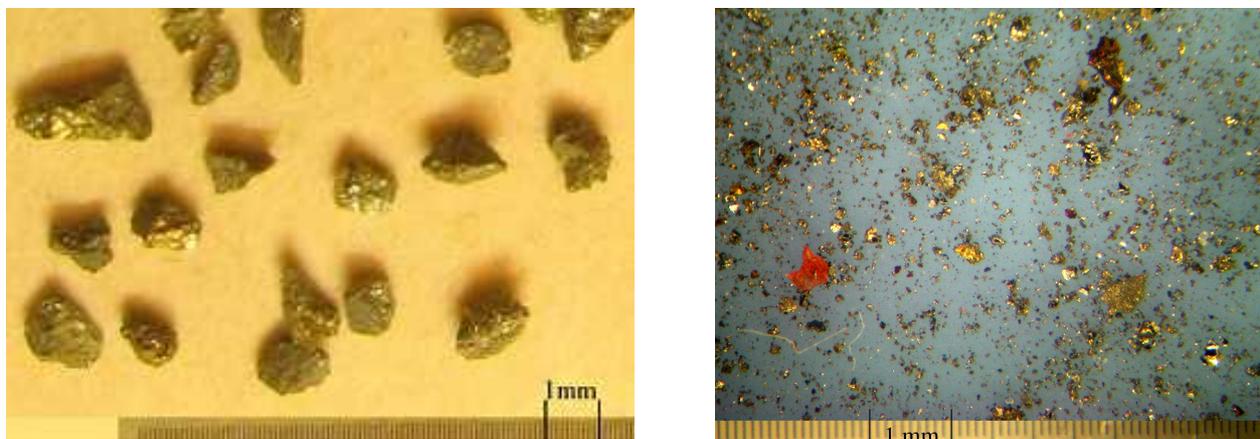


Рис.2. Результаты дезинтеграции медно-никелевой руды электровзрывным способом (на представленных фотографиях линейка соответствует масштабу 100 мкм/деление).

Для выявления эффективности электровзрывного способа дробления руды проводились эксперименты по взрыву одиночных частичек. На рис.3 представлены результаты однократного электровзрыва частички Cu-Ni руды (фото слева внизу) после разряда конденсатора $C = 0,125$ мкФ, при напряжении $U = 1,5$ кВ.

При разработке предлагаемого способа дробления и сепарации рудной массы необходима оптимизация разрушения на каждом уровне. Для представленных на рис.3 результатов оптимизация уже проведена. Она составляет 5 Дж/г. В среднем энергозатраты при электрическом взрывании находятся в пределах 5 – 50 Дж/г, что соответствует 1,39–13,9 кВт·ч/т. Разброс определяется подбором параметров разрядной цепи и составом рудной массы.

Оптимизацию энергетических затрат на дробление частиц можно вести по параметрам ампер- и вольт-секундных характеристик, и подбирать в реальных условиях необходимые параметры цепи. Основным критерием эффективного дробления проводящей фракции руды является минимизация времени разряда конденсаторов τ ($\tau \sim RC$, где R – суммарное активное сопротивление электрической цепи) при необходимой энергии на дробление частички и постоянной индуктивности L . Суть заключается в том, что для каждого уровня требуется задание оптимальных параметров C , L и U исходя из знания активного сопротивления разрядного промежутка R_A , заполненного рудой.

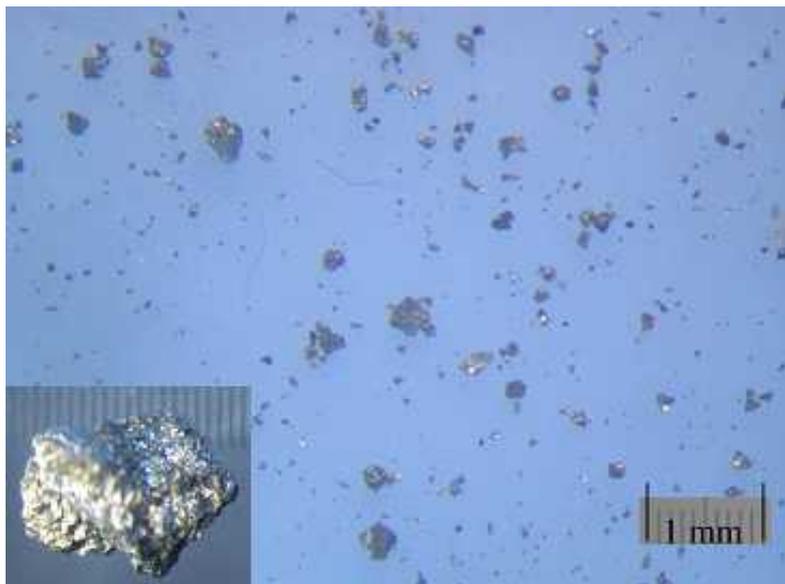


Рис.3. Результаты однократного электровзрыва частички Cu-Ni руды (фото слева внизу) после разряда конденсатора $C = 0,125$ мкФ, при напряжении $U = 1,5$ kV.

Так для примера, представленного на рис. 3, индуктивность разрядного контура $L=0.46$ мкГн. Значение волнового сопротивления цепи $R_{LC}=(L/C)^{1/2}$ составило 1.9 Ом. Эксперименты выполнялись преимущественно при апериодическом разряде конденсатора, т.е. при $R_A > 2 \cdot R_{LC}$, где R_A – мгновенное значение сопротивления разрядного промежутка, найденное экспериментально при помощи ампер- и вольт-секундных характеристик разряда. Следует особо отметить, что R_A зависит от напряжения на конденсаторе. Так, например, при $U = 200$ В минимальное активное сопротивление разряда, рассчитанное для одной пары осциллограмм напряжения и тока, составило 60 Ом. При увеличении U до 1000 В и при том же количестве частиц между электродами минимальное значение R_A уменьшилось до значений ~ 3.8 Ом, т.е. примерно до $2 \cdot R_{LC}$. Величина R_A является случайной и изменяется от разряда к разряду, оставаясь при этом больше $2 \cdot R_{LC}$. Зависимость R_A от U , можно объяснить зажиганием локальных разрядов между частичками и металлическими электродами (А, В).

С целью понимания механизмов электровзрывного дробления рудных частиц была выполнена серия экспериментов по изучению разрядов в слабых электролитах для щелевых металлических зазоров (постановка Рис. 1) и для щелевых отверстий в диэлектрических пластинах. Киносъемка начальной стадии разряда на концентраторе тока в виде треугольника со щелью в диэлектрической пластине (модель щели-трещины) показала, что начало энерговыведения инициируется в вершине наименьшего угла треугольной щели (Рис. 4, кадр 1, направление тока перпендикулярно плоскости

диафрагмы, рисунку), с перемещением в более широкую область конуса. Это соответствует наибольшей плотности тока на границе в заданном сечении. Теоретически этот факт был рассмотрен ранее в работе [10] для круглого отверстия в диафрагме, где показано, что распределение мощности энерговыделения вдоль радиуса в сечении отверстия диафрагмы экспоненциально спадает к оси, что соответствует экспериментальным результатам работы [8]. Аналогичная динамика отслеживается и для диафрагм сложного профиля, что в частности мы видим на Рис. 4.

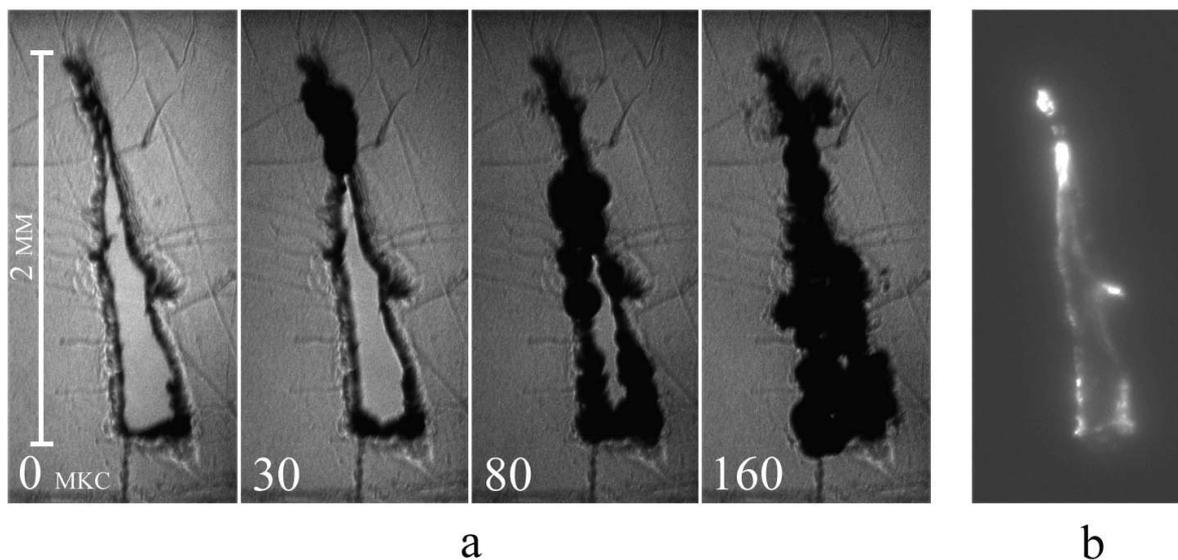


Рис. 4 Развитие электрического пробоя в треугольном отверстии лавсановой пленки толщиной 0,1 мм: а) – теньевая кинограмма развития пробоя, б) – интегральное свечение пробоя

Данное моделирование позволяет предполагать, что пробой с разрушением руды происходит по границам частиц, в щелях, в сростках, как показано в модельных экспериментах для клиновидных концентраторов тока. Для зазоров с металлическими частицами эффект усиливается, пробой начинает развиваться так же с наименьшего расстояния между частицами - обострителями, -электродами. Отличие заключается в том, что в зазорах из металлических частиц со слабо проводной среды инертной рудной массы, или в виде окисных слоев, пробой происходит по нормали к металлическим концентраторам тока из частиц меди-никеля. Такой электро-разряд с пробоем можно назвать поперечным разрядом, что соответствует общей постановке экспериментов (Рис.1). А в отсутствии металлических концентраторов тока в заданном промежутке металлических электродов пробой интегрально развивается по нормали к электродам, но развитие может происходить вдоль диэлектрических или слабо проводящих поверхностей

[8, 10]. Разряд-пробой, происходящий вдоль диэлектрических и слабо проводящих границ можно назвать скользящим, или продольным. В целом развивается продольно-поперечный разряд с пробоем-взрывом между частицами, включая сrostки.

Зажигание разрядов обеспечивает пробой окисных слоев на частичках и улучшает электрические контакты между частичками и электродами путем зажигания плазменных промежутков. Подобные процессы могут происходить и внутри сrostков. В итоге, пренебрегая активным сопротивлением подводящего контура и плазменных промежутков, можно считать, что $R \approx R_A$, является сопротивлением комплекса проводящих частичек руды, соединённых друг с другом параллельно и последовательно. Оптимальные значения U и C , найденные экспериментально, т.е. значения при которых дробление проводящей руды происходит наиболее эффективно, позволили определить энергию эффективного дробления $E_{\text{эф}}$, приходящуюся на единицу массы руды: $E_{\text{эф}}=1/2(CU^2)/m$, где m – масса частиц руды в зазоре сепаратора.

При увеличении ёмкости и при сохранении напряжения на конденсаторе, энергия последнего увеличивается, а эффективность дробления руды падает. Это связано с образованием парогазовых пузырьков на контактных границах, которые осуществляют сдвиг частиц руды от поверхности электродов, что приводит к нарушению электрического контакта между электродами и частицами. Уменьшение величины рабочего напряжения ограничено минимальной величиной, при которой происходит пробой на контактных границах и в порах частиц. В итоге суммарный ток разряда, протекающий через проводящую руду, уменьшается. При значениях меньших $E_{\text{эф}}$, электрической энергии не хватает для того, чтобы произошёл тепловой нагрев и пробой среды в порах, и эффективного разрушение частиц не происходит. При этом энергия может затрачиваться лишь на нагрев воды на границе частичек, с образования кавитационных пузырьков, которые обеспечивают только поверхностную «обдирку» частиц. В этом случае эффективность дробления руды падает на порядок.

Этот факт проверялся в специальных экспериментах по безконтактному воздействию электрического тока на частичку: частичка помещалась в коническое отверстие в диэлектрической пластине. Electroды в виде колец располагались с двух сторон диэлектрической пластины. Electroды находились на расстоянии 1-1,5 мм от частички. Устройство помещалось в слабый водный раствор поваренной соли (1-3%). В этой постановке разряд развивается в зазоре отверстия диафрагмы и границей частички, с образованием пульсирующих пузырьков [8]. При этом энергия затрачивается лишь на нагрев воды на границе частички, с образования кавитационных пузырьков, которые взаимодействуют с частичкой. В этом случае дробление происходит за счет

гидродинамических процессов при расширении и кумулятивном коллапсе пузырьков на границе с частичкой.

Проведенные эксперименты позволили нам предположить, что в основе электровзрывного разрушения электропроводящих и слабо проводящих частичек руды лежат два механизма локального электровзрыва: 1) поперечный разряд-пробой между частицами включая зазоры в сростках между металлическими частицами, 2) продольный разряд-пробой вдоль граничных слабо проводящих поверхностей. В целом это смешанный продольно-поперечный разряд с пробоем между частицами, включая сростки. Учитывая, что металлическая поверхность в сростках имеет окисный слой, и, учитывая, что окисные слои, как правило, состоят из пор, то эти факты позволяют предполагать увеличение тока в окисных порах и локальное выделение энергии внутри частиц руды, в виде многоочаговых микропробоев [9], это и приводит к диспергированию частиц.

В вариантах малой электропроводности руды пробой развивается преимущественно по поверхности частичек в виде скользящего разряда. В этом случае энергия конденсатора затрачивается на образование пузырьков газа на поверхности руды, и дробление протекает за счет гидродинамических процессов расширения и захлопывания пузырьков. Этот процесс аналогичен процессам, происходящим при кавитационном дроблении. Следует учитывать, что кавитационные процессы дезинтеграции руды обеспечивают только последовательный поверхностный процесс разрушения частиц руды в мелкодисперсную фракцию. Этот механизм «обдирки» на порядок более энергозатратный, хотя он параллельно присутствует при электровзрывном диспергировании частиц руды.

Следует отметить, что при электровзрывном методе дезинтеграции руды присутствуют два механизма разрушения: 1) взрыв частичек с диспергированием до (и менее) ~10 мкм, при электропроводности руды близкой к электропроводности металлов (поперечный разряд); 2) разрушение за счет развития поверхностного пробоя вдоль граничных поверхностей при малой электропроводности руды.

На основе выявленных механизмов динамики многоочаговых разрядов разработан макет устройства электровзрывного измельчения минерального сырья (Рис.5).



Рис. 5 Макет установки для электровзрывного диспергирования частиц руды, с прецизионной регулировкой зазора между электродами.

Выводы:

1. Рассмотрены теоретические и практические основы метода электровзрывной дезинтеграции минерального сырья. Показано, что представленный метод является эффективным для селективного измельчения медно-никелевых руд.
2. Установлено, что в одном аппарате может быть реализовано измельчение и классификация измельченного материала по крупности.
3. Предложены две модели к механизму электровзрывного разрушения руды, и оценены затраты электроэнергии при использовании рассмотренного способа дезинтеграции руды с высокой и малой электропроводностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты: № 05-08-18145, № 06-02-17453).

Литература

1. **Чангурия В.А.** Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Горный журнал. – 2005. – №12, с.56-64.
2. **Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли** /РАН, АГН, РАЕН, МИА: Под ред. К.Н. Трубецкого. – М.: Изд-во АГН, 1997. – 478 с.

3. **Teslenko V.S., Malykh N.V., Sankin G.N.** Induced cooperative processes of oscillation and stabilization of cavitation cluster in ultrasonic field // Abstracts of 17-th International Symposium on nonlinear acoustics Pennsylvania, USA, 18-22 July, 2005, P. 1015.
4. **Изотов А.С., Ростовцев В.И.** Влияние радиационных воздействий на раскрытие минеральных сростков труднообогатимых руд / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых»(ФТПРПИ).–2003.–№ 2.–С.81-90.
5. **Анушенков А.Н., Бочкарев Г.Р. и др.** Интенсификация измельчения и раскрытия руд сложного состава гидроударно-кавитационными воздействиями / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых»(ФТПРПИ).–2002.–№ 3.– С.81-90.
6. **Кондратьев С.А., Ростовцев В.И., Вейгельт Ю.П.** Энергетические воздействия и перспективы их использования при обогащении минерального сырья / Материалы 2-ой научно-технической конференции, посвященной 100- летию завода « Труд»: Гравитационные методы обогащения. Современное обогатительное оборудование и новые технологии для переработки минерального сырья. – Новосибирск: Сибпринт, 2005. – С.53-65.
7. **Юткин Л.А.** Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Изд-во «Машиностроение» Ленинградское отделение, 1986.
8. **Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Санкин Г.Н.** Автоциклический кольцевой пробой в электролите с вынужденным коллапсом пузырьков. Письма в ЖТФ, 2006, т. 32, в. 4, с 24-30. <http://www.ioffe.ru/journals/pjtf/2006/04/p24-31.pdf>
9. **Санкин Г.Н., Дрожжин А.П., Ломанович К.А., Тесленко В.С.** Многоочаговый электроразрядный диафрагменный генератор ударных волн в жидкости // Приборы и техника эксперимента, № 4, 2004, с. 114-118.
10. **Дрожжин А.П., Карпов Д.И., Тесленко В.С.** Формирование многоочагового разряда в воде // Сборник трудов 8-ой Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». Санкт-Петербург, Россия, 2006, с. 164-167.