

УДК 622.023:537.52:532.5

**С.Ю. Макеєв, В.Я. Осенний,
В.И. Емельяненко**

**ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ
ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ МЕТОДЫ
РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины,
Днепропетровск*

Наведені результати теоретичних, експериментальних досліджень та промислового впровадження електрогідроімпульсного методу руйнування гірських порід. Описані розроблені в ІГТМ НАН України установки і умови їх промислових дослідів, а також різноманітні використання електричного розряду в інших галузях промисловості.

Приведены результаты теоретических, экспериментальных исследований и промышленного внедрения электрогидроимпульсного метода разрушения горных пород. Описаны разработанные в ИГТМ НАН Украины установки и условия их промышленных испытаний, а также различные применения электрического разряда в других отраслях промышленности.

При выходе Украины на международный рынок заостряется проблема конкурентоспособности нашей экономики и ее отдельных секторов. Учитывая базовый характер минерально-сырьевых ресурсов, можно констатировать, что диверсификация источников получения минерального сырья становится одним из способов обеспечения экономической независимости державы. Горная промышленность может стать рентабельной и конкурентоспособной только при условии максимального экономически оправданного использования таких видов технологий, которые позволяют максимально минимизировать оказываемое ими нежелательное влияние на природную среду и здоровье людей.

Для уменьшения вредного влияния на окружающую среду необходимо совершенствовать оборудование и технологии преимущественно за счет роста производительности труда, применения новой высокоэффективной техники, комплексной механизации и автоматизации технологических процессов. Одной из эффективных мер увеличения единичных мощностей агрегатов, применяемых в горной промышленности, является использование нетрадиционных, принципиально новых физических процессов и явлений, характеризующихся мгновенным выделением накопленной энергии с последующим ее трансформированием и

дальнейшим использованием в технологических схемах.

В горном деле технико-экономические показатели определяется, прежде всего, эффективностью процесса разрушения пород. С переходом горных работ на большие глубины, как при подземной добыче полезных ископаемых, так и при открытой разработке, заметно увеличиваются прочностные характеристики породной среды, а проблема ее разрушения становится еще более актуальной. Особенно это сказывается при таких технологических операциях, как разрушение очень крепких пород, например, гранитов, базальтов и т.п. [1]. За последние годы в строительных организациях увеличился спрос на щебень и облицовочные материалы. Ввиду того, что граниты Украины обладают высокими физико-механическими показателями, красивой фактурой, возрастают требования к качеству гранитных монолитных блоков.

В ИГТМ НАН Украины качестве одного из перспективных способов разрушения горных пород используется безопасный и экологически чистый электрогидроимпульсный (ЭГИ) способ разрушения. Способ основан на эффекте Л. Юткина [2], при котором электрическая энергия непосредственно без промежуточных звеньев преобразуется в механическую. Рабочей средой, передающей воздействие на породу, является обычная водопроводная вода. Воздействие на горную породу осуществляется путем осуществления

© **С.Ю. Макеєв, В.Я. Осенний,
В.И. Емельяненко., 2011**

мощных подводных плазменных искровых разрядов, которые формируют в жидкости ударные волны и волны разрежения. Взаимодействие их с горной породой, а также квазистатическое давление, в свою очередь, вызывает в породе процессы создания напряжений и последующего ее разрушения. Это позволяет исключить такие общеизвестные недостатки традиционного буровзрывного способа, как разлет осколков при дроблении, высокие удельные показатели загрязнения окружающей среды газопылевыми компонентами взвешенных веществ, шумовой эффект от проведения взрывов, вынужденные простои оборудования при выводе техники и людей на время взрывных работ. В результате применения дистанционных систем управления происходит полная ликвидация ручного труда и повышение его производительности.

В ИГТМ НАН Украины проведены теоретические исследования гидродинамических процессов, происходящих при электрическом разряде в жидкости. На основе анализа волновых процессов, протекающих в жидкости при разряде, разработаны математические модели расчета параметров ЭГИ разрушения горных пород шпуровыми устройствами. В зависимости от объема жидкости для вычислений рекомендовано использовать либо метод Годунова [3], либо разработанную модель квазистационарности [4]. Последняя позволяет учитывать при расчетах истечение жидкости через зазор между электродом и стенкой шпура, величину и тип зазора.

Модель справедлива при выполнении следующего критерия:

$$\frac{x}{a \cdot t} < 0,1, \quad (1)$$

где x – характерный размер,
 a – скорость звука в воде,
 t – длительность полупериода тока электрического разряда.

Такой подход упрощает расчеты гидродинамики разряда ввиду того, что предполагаемое допущение (1) позволяет считать, что

плотность жидкости является функцией времени и не зависит от координаты.

В качестве уравнения состояния взято уравнение Тэта [5]:

$$P = B (\rho / \rho_0)^n - B \quad (2)$$

где P – давление,
 B – коэффициент равный 304,5 МПа,
 ρ – плотность,
 ρ_0 – плотность воды при нормальных условиях,
 $n = 7,15$.

Выполнены расчеты предельных напряжений в горной породе, необходимых для ее разрушения. При проведении расчетов принимали критерий прочности, согласно которому разрушение будет происходить по линии максимальных касательных напряжений [6]. Тогда, используя метод линий скольжения [7] и критерий Кулона [8], аналитическим путем установлено соотношение, по которому определяют необходимое давление в шпуре негабарита:

$$P = \frac{k}{\mu} ((D/d)^{2\mu} - 1) \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (3)$$

где k – предел прочности породы на сдвиг;
 μ и φ – соответственно коэффициент и угол внутреннего трения породы;
 D и d – средний размер негабарита и диаметр шпура в нем.

Это выражение позволяет определять давление, которое требуется создать для разрушения горной породы в зависимости от геометрических и физико-механических свойств породы. Установлены закономерности изменения предельных напряжений с ростом скорости деформации. Так, с увеличением скорости деформации $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial t}$ сопротивление сдвигу τ увеличивается, а угол внутреннего трения φ уменьшается [9].

Зависимость предельных напряжений σ_r от скорости деформации для разных объемов негабарита изображена на рисунке 1.

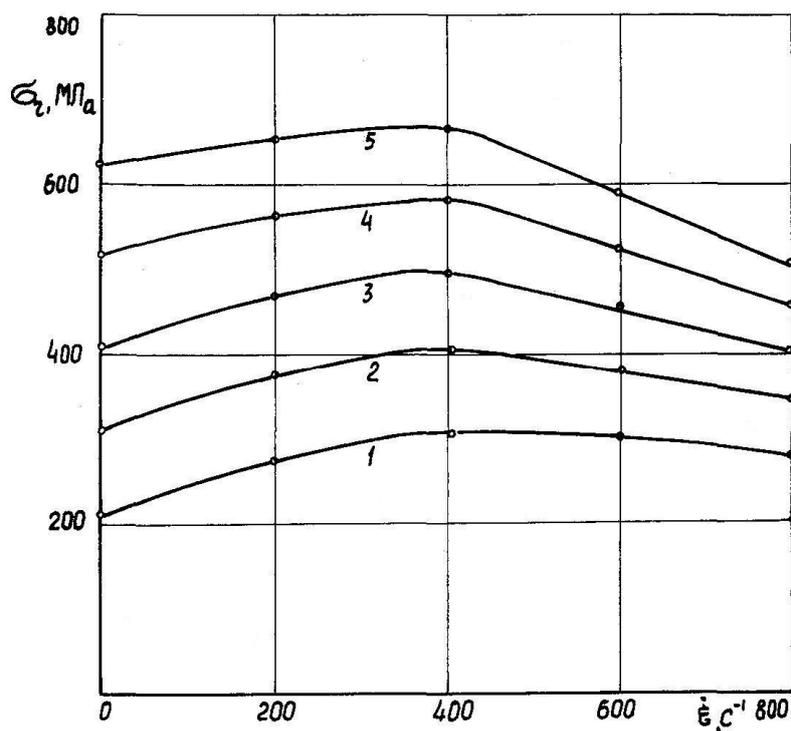


Рисунок 1 – Залежності граничних напружень σ_r від швидкості деформації:
 1 – $V=0,21 \text{ м}^3$; 2 – $V=0,56 \text{ м}^3$; 3 – $V=1,15 \text{ м}^3$; 4 – $V=2,07 \text{ м}^3$; 5 – $V=3,37 \text{ м}^3$

Разработан способ управления процессом выделения энергии при электрическом разряде путем использования многоэлектродных систем и изменения состава и концентрации рабочей жидкости. При использовании многоэлектродной системы рабочего органа [10] в жидкости одновременно формируется несколько плазменных каналов. В результате этого происходит суммирование ударных волн и волн давления, что приводит к повышению максимального давления в жидкости и более эффективному преобразованию выделяющейся в плазменных каналах энергии в работу разрушения. Для определения состава и концентрации рабочей жидкости электроразряда выполнены термодинамические расчеты параметров энерговыделения [11]. Вычислялась изотермическая работа A протекающих процессов при переходе вещества из заданного состояния в равновесное [12]:

$$A = R \cdot T \cdot \ln(P_0^{-\sum v_i} \prod (P_{i \text{ равн.}})^{v_i}), \quad (4)$$

где R – универсальная газовая постоянная;
 T – температура;
 $P_{i \text{ равн.}}$ – парциальное давление отдельного компонента в состоянии термодинамического равновесия;

v_i – число молей отдельного компонента, принимающего участие в процессе, и взятого со знаком минус если это исчезающий компонент.

Расчеты позволили путем определения изотермической работы протекающих процессов определить долю дополнительной энергии, которую приносят различные компоненты рабочей жидкости в общее выделение энергии при электрическом разряде.

На основе приведенных, а также лабораторных и экспериментальных исследований разработаны технологии и созданы машины для разрушения горных пород, принцип действия которых основан на использовании электрического разряда [13]. Установки предназначены для дробления кусков скальной породы объемом до $3,5 \text{ м}^3$ с коэффициентом крепости 10-18 по шкале проф. М.М. Протодьяконова (граниты, базальты и другие породы) при ведении открытых горных работ (рисунок 2), а также для направленного раскола блочного камня (рисунок 3). Установки прошли успешную опытно-промышленную проверку в условиях Кудашевского гранитного карьера, Старо-Кодакского участка Днепровского гранитного карьера, Кременчугского карьера нерудоис-

копаемых и других карьеров Украины [14]. В процессе испытаний установок проведены хронометражные наблюдения за их работой и отработаны параметры электрогидроимпульсных породоразрушающих рабочих органов и установок в целом при различных

условиях и режимах их эксплуатации. В качестве рабочих органов на установках использовались либо электрогидроимпульсный шпуровой взрыватель, работающий в комплексе с перфоратором, либо электрогидроимпульсный генератор ударных волн.



Рисунок 2 – Установка механизации бурения и разрушения негабаритов

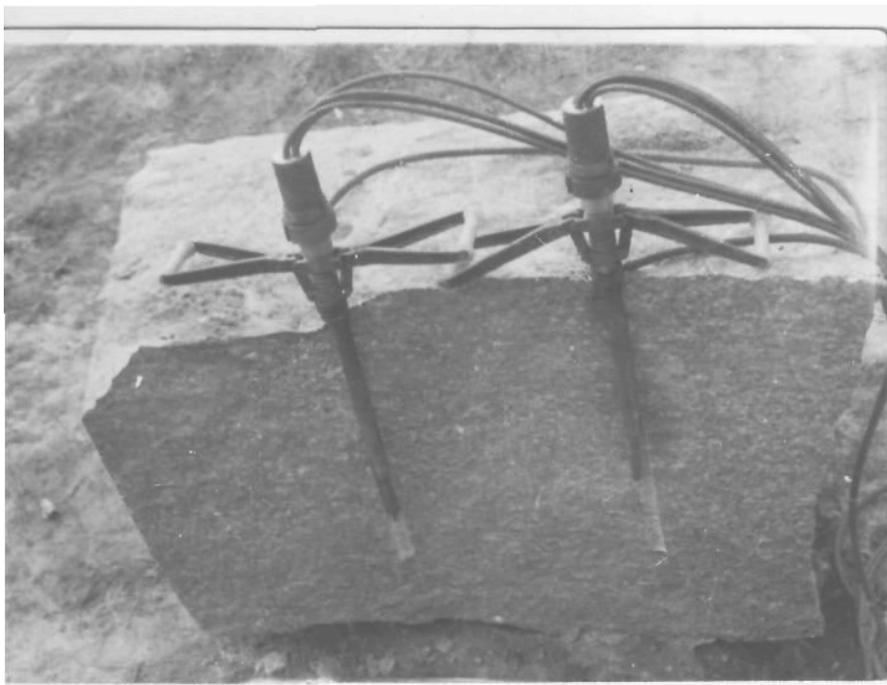


Рисунок 3 – Раскол блочного камня ЭГИ методом

ЭГИ способ уже широко применяется в различных технологических процессах в горной и металлургической промышленности. Тот факт, что в процессе производства обязательно наличие жидкой фазы (воды), значительно улучшает санитарно-гигиенические условия труда, уменьшая пылевыделение на стадии измельчения пород и руд. Так, при удалении шлама и очистке отливок от стержневых и формовочных смесей ЭГИ способом [15, 16] создаются безопасные условия труда при повышении его производительности, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда путем исключения тяжелого физического труда и снижения запыленности, сокращается численность рабочего персонала, уменьшаются расходы электроэнергии и воды в сравнении с гидроструйным методом. При измельчении горных пород с использованием электрического

разряда [17, 18] значительно уменьшается пылевыделение и удается достичь высокой степени измельчения, затруднительной для традиционных способов, где применяются разного рода конусные и щековые дробилки. Очень хорошо себя показал метод очистки от загрязнений коллекторов на теплоцентралях, когда с помощью электрического разряда очищались от нароста внутренние поверхности труб (рисунок 4). Альтернативы такой технологии в настоящее время не найдено. Все применяемые другие способы очистки (механический, гидравлический, химический и прочие) не давали такого эффекта, и были в несколько раз более трудозатратными. А если говорить об экологическом аспекте, то здесь бесспорно абсолютное преимущество ЭГИ технологии над вышеперечисленными.



Рисунок 4 – Труба коллектора теплоцентрали до и после очистки

Неоспоримые достоинства метода, такие как отсутствие выделения вредных веществ, разрушительных акустических и сейсмических ударных волн, наличие контроля над процессом вложения энергии давно привле-

кают внимание специалистов строительной индустрии [19, 20]. В течение нескольких последних лет этот интерес заметно усилился из-за резкого обострения экологических проблем и усиления внимания к разработке

новых экологически чистых технологий. Во многих случаях им отдается предпочтение, даже если они проигрывают традиционным технологиям в эффективности, в особенности, если их применение снижает долю ручного труда и риск для обслуживающего персонала. По этим причинам работы по использованию электроразрядных технологий ведутся сейчас рядом крупных лабораторий США и других развитых стран [21]. ЭГИ способ также нашел широкое применение в технологиях очистки и обеззараживания воды [22, 23], угнетения радиации [24], ремонта судов [25], борьбы с оползнями [26], в медицине для дробления почечных камней [27], в сельском хозяйстве для подготовки зерна и удобрений [28, 29] и во многих других отраслях.

Отдельно остановимся на экологических аспектах технологии интенсификации добычи углеводородного сырья в нефтегазовой промышленности. Раньше, когда нефтегазовая промышленность была в государственной собственности, при освоении месторождений в основном бурили новые скважины, а истощившиеся ставили на консервацию. В настоящее время лицензии на опытно-промышленную эксплуатацию все чаще выдают частным компаниям, которые не имеют больших средств на бурение новых скважин. Такие ООО, ЧП, ОАО и другие фирмы взяли за вторичную добычу из законсервированных ранее скважин. Для восстановления работы скважин, снизивших свой дебит ниже рентабельного, как правило, применяют методы химического растворения кольматирующих загрязнений призабойной зоны пласта. При этом в скважину нагнетают в больших количествах различные смеси, содержащие кислоту и множество других химических соединений, которые кроме положительного эффекта вызывают также интенсивное загрязнение и повышение минерализации почвенных вод. Кроме

прямого вреда здесь нельзя забывать и об отдаленных последствиях от таких мероприятий, чреватых значительным экологическим ущербом для будущих поколений, которые могут быть лишены питьевой воды.

Альтернативой химическим методам интенсификации добычи углеводородного сырья является применение электрического разряда в технологической цепочке восстановления работы старых газовых и нефтяных скважин [30]. Технология включает бурение скважины с поверхности, заполнение скважины водой и реализация в ней плазменного искрового разряда с использованием электрогидроимпульсного устройства.

Совместно с МакНИИ по безопасности работ в горной промышленности в ИГТМ разработаны экспериментальные образцы исполнительных рабочих органов с герметизирующим устройством для комплекса разгрузки и дегазации выбросоопасных угольных пластов. Комплекс прошел опытно-промышленные испытания на полигоне и в полевых условиях ПО «Октябрьуголь» при обработке с поверхности угольного пласта, залегающего на глубине 400 м. Приемистость пласта после обработки ЭГИ способом возросла в 3,5 раза.

Подводя итоги, хочется отметить следующее: когда говорят о преодолении экологических последствий антропогенной деятельности человека, чаще всего речь идет о необходимости устранения этих последствий [31], в то время как следует говорить о недопустимости их возникновения в принципе. То есть надо стремиться к устранению не следствия, а причины. Этого можно достичь только переходя на такие технологии, которые по своей сути в идеале исключают, а реально максимально минимизируют загрязняющий фактор от техногенного воздействия. Такими технологиями как раз и являются описанные выше.

Перечень ссылок

1. Булат А.Ф. Изменение структуры горных пород при их разрушении электрическим разрядом в жидкости / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний, В.И. Емельяненко, С.Ю. Андреев // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках : Матер. XVI Межд. науч. школы. – Симферополь : Таврич. нац. ун-т. – 2006. – С. 40-44.
2. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.

3. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М. : Наука, 1976. – 440 с.
4. Головки Ю.Н. Модель квазистационарности для расчета гидродинамических параметров электрических разрядов в камерах / Ю.Н. Головки, С.Ю. Макеев: Ин-т геотехн. мех. АН УССР. – Днепропетровск, 1985. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 18.07.85. № 5253-85.
5. Коул Р. Подводные взрывы / Р. Коул. – М.: Изд-во иностр. лит, 1950. – 494 с.
6. Слепян Л.И. О модели в теории волн хрупкого разрушения/ Л.И. Слепян. – Изв. АН СССР, Механика твердого тела, 1977. – № 1. – С. 181-186.
7. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением / Громов Н.П. – М. : Metallurgiya, 1967. – 340 с.
8. Новожилов В.В. Теория упругости / В.В. Новожилов. – Л. : Судпромгиз, 1958. – 372 с.
9. Мохначев М.П. Динамическая прочность горных пород / М.П. Мохначев, В.В. Присташ. – М. : Наука, 1982. – 144 с.
10. А.с. 1297553 СССР, МКИ E21C 37/18. Электродная система для разрушения горных пород / С.А. Полуянский, В.И. Емельяненко, О.А. Колесов, А.Г. Мнухин, Л.А. Вайнштейн (СССР).
11. Макеев С.Ю. Термодинамические аспекты выбора рабочей среды для реализации электроразряда // Физика импульсных воздействий на конденсированные среды: Тез. докл. VI научной школы, Николаев, сентябрь 1993 г. – Киев : Наук. думка, 1993. – С. 71.
12. Синярёв Г.Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчётов металлургических процессов / Г.Б. Синярёв, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. - М.: Наука, 1982. – 264 с.
13. Emeljanenko V.I. Ecological pure plasma method rock breaking / V.I. Emeljanenko, S.U. Makeev // Progress in Plasma Processing of Materials: Proceeding of the Sixth European Conference on Thermal Plasma Processes in Strasbourg (France), New York – Wallingford, U.K.: Begell house, inc., 2001. – P. 611-616.
14. Емельяненко В.И. Результаты испытаний установки механизации бурения и разрушения негабаритов / В.И. Емельяненко, С.Ю. Макеев, В.И. Нападайло // Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности: Тез. докл. V Всесоюзной научно-технич. конференции, Николаев, сентябрь 1992 г. – Киев : Наук. думка, 1992. – С.190.
15. Иванов В.Т. Технология электрогидравлической очистки отливок / В.Т. Иванов // Технология, организация и механизация литейного производства. – 1982. – Вып. 16. – С. 10-11.
16. Петрусенко С.А. Состояние и перспективы внедрения технологии электрогидравлической выбивки стержней / С.А. Петрусенко // Литейное производство. – 1981. – № 6. – С. 17-18.
17. Голдаев В.С. Некоторые особенности измельчения известняковой щебенки разрядами в воде / В.С. Голдаев, А.П. Ардашев // Электрон. обраб. материалов. – 1981. – № 4. – С. 72-74.
18. Малюшевский П.П. О механизме тонкого измельчения при электрическом взрыве в ограниченном объеме / П.П. Малюшевский // Электрон. обраб. материалов. – 1982. – № 3(105). – С. 58-63.
19. Блазин Б.С. Обработка природного камня электрическими разрядами / Б.С. Блазин, И.А. Щеголев, Л.И. Лозин // Электрон. обраб. материалов. - 1983. - № 1(109). - С. 5-7.
20. Плотников И. Разрушение бетона и железобетона при разрушении промышленных предприятий / И. Плотников, Д. Александров // Строительство металлургических и химических предприятий. – М. : ЦБНТМ. –1981. – Сер. 1. – Вып. 1. – С.6-8.
21. Еремин В.Я. Разрядно-импульсные технологии на стройках России / В.Я. Еремин // Стройклуб. – 2002. – № 1-2 (9-10). – С. 11-15.
22. Жук Е.Г. Бактерицидные факторы импульсного электрического разряда при обеззараживании воды / Е.Г. Жук // Электрон. обраб. материалов. – 1978. – № 4. – С. 80-83.
23. Перевязкина Е.Н. Природа обеззараживающего действия импульсного электрического разряда в воде / Е.Н. Перевязкина, Н.Д. Рязанов // Электроимпульсная технология и электромагнитные процессы в нагруженных твердых телах : Тез. Всес. науч. совещания. – Томск, 1982. – С.98-99.
24. Патент України № 28629А, МКИ G21F 9/12. Спосіб отримання води, обробленої високочастотним розрядом для пригнічення радіоактивного випромінювання / Б.М. Рогачевський, С.Ю. Макеєв, В.І. Ємельяненко, С.І. Зигало (Україна). – № 97073944; заявл. 27.11.1997; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5 (II ч.). – 9 с.

25. Гаврилов Г.Н. Использование электрогидравлического эффекта в судоремонте / Г.Н. Гаврилов, В.В. Петухов, Н.М. Ромащенко // Судоремонт флота рыбной промышленности. – Л. : Транспорт, 1984. – Вып. 56. – С.32-34.

26. Патент України № 37412А, МКИ E02D 27/26. Спосіб боротьби із зсувами ґрунту / Б.М. Рогачевський, С.Ю. Макеєв, В.І. Ємельяненко, С.І. Зигало (Україна). – № 98095092; заявл. 29.09.1998; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4 (ч. II). – 6 с.

27. Методы удаления почечных камней // БИНТИ ТАСС. – 1984. – № 15(2156). – С. 55.

28. Писаревский В.Н. Электроимпульсное стимулирование семян кукурузы / В.Н. Писаревский, В.Н. Пономаренко, А.А. Залевский // Электрон. обраб. материалов. – 1985. – № 4(124). – С. 68-69.

29. А.с.477151 СССР, МКИ C02G 1/00. Способ электрогидравлического получения удобрений / Л.А. Юткин, Л.И. Гольцова (СССР) // Открытия. Изобретения. – 1983. – № 1. – С. 272.

30. Булат А.Ф. Электроразрядное воздействие как способ структурных преобразований горных пород с целью их дегазации / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеєв, В.Я. Осенний, С.Ю. Андреев, В.И. Емельяненко, А.А. Баскевич // Геотехническая механика : Межведомственный сборник научных трудов / Ин-т геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 67. – С. 97-102.

31. Зайденварг В.Е. Влияние газопылевых отходов добычи полезных ископаемых на состав и свойства биосферы и на климат планеты / В.Е. Зайденварг, А.Т. Айруни. – М. : Изд. ЦНИЭИ-уголь, 1993. – 275 с.

*S.Y. Makeiev, V.Y. Osenniy,
V.I. Emel'janenko*

**THE ECOLOGICALLY CLEAN ELECTRIC-
DISCHARGE METHODS OF ROCK
DESTRUCTION**

*The Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics National Academy of Sciences of Ukraine,
Dnepropetrovsk*

Results over of theoretical, experimental researches and industrial introduction of electric-hydro-impulsive method of destruction of rocks are brought. Setting, which worked out in the IGTM NAS of Ukraine, and terms of their industrial tests, and different applications of electric discharge in other industries of industry are described.

*Надійшла до редколегії 03 лютого 2011 р.
Рекомендовано членом редколегії канд. техн. наук П.І. Копачем*