

Министерство топлива и энергетики Российской Федерации
Российская академия наук
Национальный Научный Центр Горного Производства -
Институт горного дела им. А.А. Скочинского

На правах рукописи
Для служебного пользования

Экз. № 11

КРАСНОВСКИЙ Соломон Сумерович

УДК 622.236.722

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЧ И СВЧ С
ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ
СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ИХ РАЗРУШЕНИЯ**

Специальность 05.15.11 - "Физические процессы
горного производства"

Д и с с е р т а ц и я
в виде научного доклада на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва

1999

Работа выполнена в ННЦ ГП - ИГД им. А.А.Скочинского.

Научный руководитель - докт.техн.наук А.В.ДОЛГОЛАПТЕВ.

Официальные оппоненты:

проф., докт.техн.наук С.А.ГОНЧАРОВ,

канд.техн.наук В.Ф.КЛЯТЧЕНКО.

Ведущее предприятие - Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова (технический университет).

Защита диссертации состоится 21 мая 1999 г. в 10 ч.
на заседании : диссертационного совета Д.135.05.03. ИГД
им. А.А.Скочинского (140004, г.Люберцы Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в секретариате ученого совета института.

Диссертация разослана 20 апреля 1999 г.

Отзывы в двух экземплярах просим направлять в адрес совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета
докт.техн.наук, проф.

Н.Ф.КУСОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации, представленной в виде научного доклада, изложены и обобщены результаты исследований, выполненных автором в период 1960-1998 гг., по разработке невзрывных экологически чистых способов и средств разрушения горных пород высокой крепости и абразивности, основанных на использовании энергии электромагнитного (ЭМ) поля высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов.

Актуальность работы. Одним из основных и трудоемких звеньев в процессе добычи и переработки полезных ископаемых является разрушение горных пород. Успехи в решении этой задачи, в особенности применительно к породам высокой крепости, без использования взрывных работ определяют во многом внедрение эффективных технологических процессов в горнорудную, угольную и другие отрасли.

Одной из главных задач в области разрушения горных пород является создание проходческой техники для пород высокой крепости и абразивности, что позволит повысить производительность и улучшить условия труда, обеспечить сохранность массива, снизить затраты на крепление и поддержание выработок. Кроме того, в ряде производственных технологий, связанных с разрушением крепких горных пород на воздухе и под водой, таких, как добыча и обработка блочного камня, дноуглубительные и аварийно-спасательные работы, проведение траншей при прокладке трубопроводов, в том числе в условиях действующего производства, применение взрывных или основанных на механическом воздействии способов становится либо невозможным, либо неэффективным.

Применительно к созданию поточных технологий при открытой и подземной добыче полезных ископаемых изыскание и внедрение невзрывных способов вторичного дробления, обеспечивающих бесперебойную работу высокопроизводительного оборудования, является также актуальной задачей.

Для решения этих задач разрабатываются физические способы разрушения, основанные на вводе в породу различных видов энергии без использования силового механического инструмента: термические, гидравлические, электрофизические.

Изыскание эффективных способов разрушения крепких горных пород на основе достижений технической физики, электротехники и электроники позволило создать электрофизические способы разрушения. Эти способы основаны на поглощении подводимой к породе электрической энергии и последующих ее преобразованиях, в результате которых происходит разрушение породы или снижение ее крепости.

Различие применяемых для воздействия источников электрической энергии при решении разнообразных технологических задач привело к разработке нескольких направлений, основанных на применении постоянного тока и промышленной частоты, электрических импульсов высокого напряжения, электронных пучков, энергии ЭМ поля ВЧ и СВЧ, излучений инфракрасного и оптического диапазонов и др.

Зарождение и развитие электрофизических способов разрушения горных пород связано с работами Г.И.Бабата, А.В.Варзина, А.В.Нетушила, В.С.Кравченко, А.П.Образцова, В.М.Семёнова, В.М.Веремьева, В.В.Устинова, В.Д.Ицхакина, Ю.Н.Захарова, Л.М.Блинова, Н.В.Перова, Г.В.Лукьянова, А.С.Сироты, Е.Н.Тимофеевой, А.В.Долголаптева, К.М.Мамыркулова, С.М.Цыганенко, Е.Ф.Элштейна, Э.И.Арша, Г.К.Виторта, В.В.Ржевского, А.П.Дмитриева, Ю.И.Протасова, Г.Я.Новика, В.С.Ямщикова, С.А.Гончарова, М.В.Рыбина, Ю.М.Мисника, Л.Б.Некрасова, В.А.Хоминского, Л.Э.Рекинглаза, Н.И.Рябеца, О.Н.Шонина, В.Ж.Аренса, Г.Х.Хчеяна, О.М.Гридина, И.В.Ляшенко, А.Ф.Гусева, В.Ф.Клятченко, А.Н.Москалева, А.А.Галёса, В.К.Коробского, О.В.Явтушенко, В.И.Лойка, А.А.Воробьева, И.И.Каляцкого, А.Т.Чепикова, М.П.Тонконогова, Н.Е.Коваленко и др.

Формирование нового научного направления по исследованию, разработке, обоснованию и эффективному применению энергии ЭМ полей ВЧ и СВЧ для разрушения крепких горных пород началось в 50-е годы (Г.И.Бабат, А.В.Варзин - ВУГИ).

Дальнейшее развитие эти работы получили в ИГД АН СССР под руководством В.С.Кравченко и А.П.Образцова и в ДГИ под руководством Е.Ф.Элштейна, затем в МГИ, ЛГИ, ИГТМ АН УССР, ИГДС ЯФ СОАН СССР, ВНИИ ТВЧ им. В.П.Вологодина.

Выполненные в 60-70 гг. исследования разрушения крепких горных пород в ЭМ полях были посвящены: ВЧ разрушению негабаритов полупроводящих пород (типа магнетитовых кварцитов) с образованием канала теплового пробоя, ВЧ разрушению негабаритов и направленному расколу природного камня диэлектрических пород со слабо изменяющимися при нагреве электрическими свойствами, СВЧ разрушению горных пород различных типов.

Применительно к разрушению массива и вторичному дроблению горных пород, как показали выполненные исследования, перспективны ВЧ-контактный и СВЧ способы.

Однако внедрение этих способов в производство возможно лишь при их совершенствовании на основе углубленного исследования физических процессов, протекающих в горной породе при воздействии на нее ЭМ поля.

2. Изучить поведение горной породы как электрической нагрузки генератора с учетом изменения свойств в процессе ЭМ воздействия и на этой основе особенности работы фидерной линии.

3. Исследовать процесс разрушения железных руд и кварцитов Кривбасса ВЧ-контактным способом применительно к дроблению их в условиях подземных работ и определить пути повышения эффективности разрушения.

4. Исследовать процесс "взрывного" разрушения влагосодержащих горных пород (типа песчаника) в ЭМ поле СВЧ, установить влияние параметров и режимов воздействия, а также физических свойств горных пород на основные показатели их разрушения для разработки бесконтактного способа проведения выработок.

5. Изучить возможность применения ВЧ воздействия на горные породы для решения различных технологических задач: подводное разрушение, направленный раскол, разрушение массива крепких горных пород, проведение выработок.

6. Обосновать технические пути повышения эффективности разрушения крепких горных пород в ЭМ полях и выбор рациональных режимов и параметров ЭМ воздействия и параметров технических средств (генератор, фидерная линия, рабочие инструменты) для решения указанных технологических задач.

7. Разработать и создать технические средства и провести экспериментальную и промышленную проверку предложенных способов и технических средств разрушения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. На процесс взаимодействия электромагнитного поля с горной породой определяющее влияние оказывают физические свойства и их изменения, они формируют в породе изменяющиеся во времени распределения ЭМ поля, энерговыделения, температурного поля, термических напряжений, давления пара (во влагосодержащих породах) и в конечном итоге определяют процесс разрушения и его показатели (удельная энергоемкость, форма и размеры продуктов разрушения) [1, 7, 8, 10, 16, 30, 31].

2. Математическая модель взаимодействия высокочастотного электромагнитного поля с горной породой с учетом изменения ее электрических свойств в процессе нагрева, описывающая формирование электрического и температурного полей, термических напряжений и комплексной электрической нагрузки генератора, раскрывающая механизм "самозаглубления" электрода [2, 3, 6-8, 13].

3. Механизм "взрывного" разрушения влагосодержащих горных пород (типа песчаника) в ЭМ поле СВЧ базируется на развитии трещин за счет совместного действия термических напряжений и порового давления паров, возникающих при фа-

Горная порода при ЭМ разрушении является средой, в которой перераспределяется и поглощается ЭМ энергия, преобразующаяся в тепловую, а также рабочим телом и разрушаемой средой. Разнообразие функций горной породы в процессе ее разрушения в ЭМ поле определяет важную роль ее различных свойств: электрических, тепловых, массопереносных, механических. Эти свойства определяются составом, строением и состоянием горной породы и зависят от параметров воздействующего ЭМ поля, то есть могут изменяться в процессе воздействия.

Знание совокупности процессов, протекающих в породе при ее разрушении, с учетом взаимосвязи изменяющихся свойств и полей является научной основой выбора рациональных параметров и режимов ЭМ воздействия. При этом разнообразие способов и технических средств ввода ЭМ энергии в породу в широком диапазоне частот и мощностей обеспечивает возможность достижения заданных параметров и режимов воздействия для эффективного разрушения при решении различных технологических задач.

Работа выполнялась в рамках планов научно-исследовательских работ ИГД им. А.А.Скочинского в соответствии с постановлениями ГКНТ СМ СССР №84 от 02.04.66 г., № 415 от 18.09.69 г., постановлением Комиссии по военно-промышленным вопросам Президиума СМ СССР № 152 от 05.05.83 г. (НИОКР "Исход", "Кибер", "Юла", "Турбобурение"), в рамках проектов отраслевого значения "Уголь России" (1990-1995 гг.) и Федеральной целевой научно-технической программы "Недра России" (1993-1998 гг.), а также работы, выполняемой при поддержке РФФИ (1998 г.).

Цель работы. Обоснование рациональных параметров и режимов электромагнитного воздействия ВЧ и СВЧ диапазонов на горные породы для разработки способов и технических средств их разрушения для решения различных технологических задач.

Основная идея работы заключается в использовании для эффективного разрушения крепких горных пород преимущественно растягивающих напряжений, формируемых путем управляемого пространственно-временного выделения ЭМ энергии в породе с учетом изменения ее свойств.

Задачи исследований. 1. Установить влияние параметров ЭМ поля ВЧ и изменяющихся при нагреве электрических свойств горных пород на развитие электрического и температурного полей в породе; разработать математическую модель процесса взаимодействия горной породы с полем высокой частоты.

разрушения отдельностей и скальных выступов, прошедший государственные испытания и переданный на вооружение военно-морского флота России;

модернизированную ВЧ-установку многоцелевого назначения для проведения исследований разрушения горных пород в массиве и направленного раскола в натурных условиях.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения диссертационной работы докладывались на Всесоюзной конференции по физике диэлектриков (Томск, 1964 г.); межвузовских научных конференциях по физике горных пород и процессов (Москва, 1967, 1971, 1974 гг.); I, II и III Всесоюзных конференциях по термомеханическому разрушению горных пород (Днепропетровск, 1969, 1972, 1976 гг.); VI, VII, VIII и IX Всесоюзных конференциях "Комплексное исследование физических свойств горных пород и процессов" (Москва, 1977, 1981, 1984, 1987 гг.); IV Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы горной теплофизики" (Ленинград, 1981 г.); IX и X Всесоюзных научно-технических конференциях "Применение токов высокой частоты в электротермии" (Ленинград, 1981, 1986 гг.); Всесоюзной конференции по механике горных пород (Днепропетровск, 1981 г.); III и IV Всесоюзных научно-практических конференциях "Применение СВЧ-энергии в технологических процессах и научных исследованиях" (Саратов, 1980, 1991 гг.); Научной конференции МФТИ "Вопросы дифракции электромагнитных волн" (Москва, 1982 г.); Международном симпозиуме по дноуглублению и подводной добыче (Ленинград, 1990 г.); Международном симпозиуме по проблемам геологии, горной науки и производства (С.-Петербург, 1993 г.); научном симпозиуме "Неделя горняка" (МГУ, 1994, 1997, 1998, 1999 гг.).

Различные этапы работы докладывались на техсоветах и совещаниях ПО "Ленинруда", ЮГОК (Кривбасс), ПО Донбасса, ДонуГИ, "ГИПРОУДМАШ", Волго-Балтийском пароходстве, ПО "Укрводпуть", ПОГК "Кузнечное", Каменогорское КУ, в/ч 20914, в/ч 34312, ВНИИ ТВЧ им. В.П.Володина, на ученых советах и научных семинарах отделений электрофизических исследований и проблем разрушения угля и горных пород ИГД им. А.А.Скочинского.

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 49 опубликованных работах, в том числе в 7 авторских свидетельствах и патентах.

Автор выражает искреннюю благодарность коллегам по работе: А.П.Образцову, Ю.Н.Захарову, А.В.Долголаптеву, Л.М.Блинову, Л.П.Шарковой, А.П.Уварову, Ю.Д.Вороновскому, В.Ф.Нистратову, А.Г.Максименко, Ю.А.Розову, за постоянное внимание и помощь в выполнении настоящей работы на различных ее этапах.

зовом переходе содержащейся в породе влаги вследствие поглощения ею ЭМ энергии [7, 22, 23, 25-27, 29, 30, 32, 33, 35, 36].

4. Эффективность операций ЭМ разрушения в технологиях (дробление, направленный раскол, подводное разрушение, проведение выработок различного назначения, отбойка блоков) достигается управлением процессом разрушения путем целенаправленного задания параметров и режимов источников ЭМ энергии на основе учета свойств горной породы и технологических условий, создания средств передачи и ввода ЭМ энергии в породу и их размещения в породе [4, 5, 9, 11-17, 19-21, 24, 28, 34, 37, 38, 41, 49].

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждаются корректным использованием фундаментальных положений теорий электромагнитного поля, теплопроводности, упругости и физики диэлектриков; хорошей сходимостью результатов теоретических расчетов с экспериментальными, полученными в лабораторных и натурных условиях (отклонения не превышают 20-25%); эффективностью применения разработанных способов разрушения и технических средств для различных технологий (подводное разрушение, дробление, разрушение массива, направленное разрушение блоков природного камня).

Научная новизна работы заключается в следующем:
установлении закономерностей формирования электрических и тепловых полей, термических напряжений в породах с изменяющимися при нагреве электрическими свойствами;

создании математической модели процесса нагрева породы в ВЧ поле, раскрытии на ее основе физической сущности явления "самозаглубления" электрода;

получении и описании механизма "взрывного" разрушения влагосодержащих горных пород в СВЧ полях;

разработке способов управления процессом разрушения при ЭМ воздействии;

обосновании рациональных параметров и режимов ЭМ воздействия на горные породы на основе учета их свойств применительно к решению различных технологических задач разрушения.

Практическая значимость работы заключается в том, что в результате выполненных исследований разработаны экспериментально подтвержденные рекомендации, исходные требования, технические задания, позволившие создать:

оборудование для комбинированного разрушения железных руд и кварцитов, прошедшее опытную проверку в шахтах Кривбасса;

комплекс опытно-промышленного оборудования (ВЧ-генератор, фидерная линия, рабочий инструмент) для подводного

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ГОРНОЙ ПОРОДОЙ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПРИ НАГРЕВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Физическая сущность ВЧ-контактного способа разрушения горной породы состоит в диэлектрическом нагреве ее в существенно неоднородном электрическом поле и возникновении вследствие неравномерного нагрева температурных напряжений, приводящих к разрушению породы.

Исследования высокочастотного контактного способа разрушения различных горных пород проводились ранее для решения различных технологических задач (дробление негабаритов, направленное разрушение). Наиболее изученным является процесс разрушения пород типа магнетитовых кварцитов, в основе которого лежит явление теплового прооя, а также пород со слабо изменяющимися при нагреве электрическими свойствами.

При ВЧ воздействии на породы-диэлектрики важнейшую роль в процессе их нагрева и формирования поля температурных напряжений во времени играют изменяющиеся электрофизические свойства этих пород. В связи с этим были изучены зависимости электрофизических свойств (диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$) различных горных пород (окисленных железных руд и кварцитов, гранитов, гнейсов, песчаников и др.) в широком диапазоне частот ЭМ поля (от 50 кГц до 50 МГц) от температуры (до 800°C), влажности, содержания солей в растворе, напряженности электрического поля [1, 8, 16, 10].

Решена задача о диэлектрическом нагреве породы с зависящими от температуры диэлектрическими свойствами в неоднородном электрическом поле сферического электрода [2, 3, 6, 7]. Анализ распределения электрического поля в породе показал, что в зоне $r \approx 10 r_0$ (r_0 - радиус электрода) выделяется более 90% всей энергии, и поле может быть аппроксимировано как сферически симметричное ($r \leq 0,4h$, где h - расстояние до второго заземленного плоского электрода), что обосновывает модель поставленной задачи:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{\rho'(T(r, \tau))}{c_v} \left(\frac{I(\tau)}{4\pi r^2} \right)^2; \quad (1)$$

$$I^2(\tau) = \frac{U^2(\tau)}{\left[\int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho'(T(r, \tau)) dr}{4\pi r^2} \right]^2 + \left[\int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho''(T(r, \tau)) dr}{4\pi r^2} \right]^2}, \quad (2)$$

при следующих граничных и начальном условиях:

$$\frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial T(r_0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad T(r, 0) = T_0, \quad (3)$$

где $T(r, \tau)$ - распределение температуры в горной породе; a и c_v - температуропроводность и объемная теплоемкость породы; ρ' и ρ'' - активная и реактивная составляющие удельного сопротивления горной породы;

$$\rho'(T) = \frac{\text{tg} \delta(T)}{2\pi f \epsilon(T) [1 + \text{tg}^2 \delta(T)]} \text{ и}$$

$$\rho''(T) = \frac{1}{2\pi f \epsilon(T) [1 + \text{tg}^2 \delta(T)]}$$

f - частота электромагнитного поля; $I(\tau)$ - ток в горной породе; $U(\tau)$ - напряжение на сферическом электроде; $\epsilon(T)$ и $\text{tg} \delta(T)$ - диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь породы; выражения в скобках в знаменателе формулы (2) являются активной $R_H(\tau)$ и реактивной $X_H(\tau)$ составляющими комплексной нагрузки; $P_H(\tau) = R_H(\tau) I^2(\tau)$ - общая активная мощность;

$p_{уд}(r, \tau) = \rho'(r, \tau) \left(\frac{I(r)}{4\pi r^2} \right)^2$ - удельная активная мощность тепловых источников в породе.

Решение задачи состоит в определении температур в горной породе в процессе нагрева $T(r, \tau)$ (рис. 1). Определение этой функции позволяет найти распределение электрических свойств $\rho'(r, \tau)$ и $\rho''(r, \tau)$ в процессе нагрева, а также комплексное сопротивление нагрузки $Z_H(\tau) = R_H(\tau) - jX_H(\tau)$ и $P_H(\tau)$ (рис. 2).

Задача решена с использованием ЭВМ методом конечных разностей. Для конкретных задач $\epsilon(T, f)$, $\text{tg} \delta(T, f)$, f , U_0 , r_0 и a получены распределения $T(r, \tau)$, $Z_H(\tau)$, $P_H(\tau)$. В дальнейшем распределения $T(r, \tau)$ использовались для нахождения термических напряжений $\sigma_\theta(r, \tau)$ и $\sigma_r(r, \tau)$ в блоках различных размеров.

Полученные результаты являются основой для выбора параметров установки - рабочей частоты, мощности, размеров электрода, диапазона согласования генератора, обеспечивающих эффективное разрушение горной породы в зависимости от

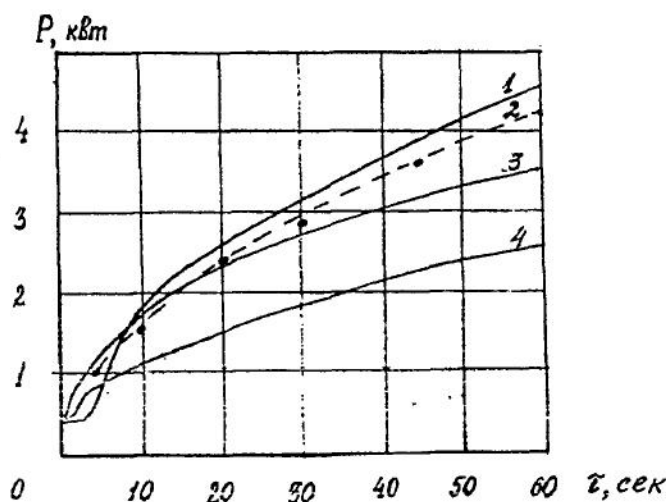


Рис. 2. График зависимости мощности, выделяемой в породе, от продолжительности ВЧ-воздействия ($r_{эл}=1$ см, $f=5,28$ МГц, $U_{вч}=5$ кВ):

1 - с учетом теплопроводности, $\text{tg}\delta=0,1e^{0,01T}$; 4 - без учета теплопроводности, $\text{tg}\delta=0,1e^{0,01T}$; 2 - экспериментальные точки (мартитовая руда); 3 - без учета теплопроводности, $\text{tg}\delta=0,1e^{0,02T}$

Полученные результаты позволили выяснить влияние ряда свойств породы и параметров электрофизического воздействия на развитие процесса нагрева и объяснить некоторые его особенности: перемещение зоны максимальной мощности тепловых источников в глубь породы (явление "заглубления" электрода), существенную нелинейность процесса, сложный характер изменения электрической нагрузки.

В процессе интенсивного выделения энергии в породе в приэлектродной зоне температура возрастает и происходит снижение значения ρ' , определяющего темп нагрева; напряженность на этом участке резко снижается, при этом интенсивному нагреву подвергается более удаленная от электрода зона. Таким образом, от электрода в глубь породы происходит перемещение зоны максимальной скорости нагрева. Зона, нагретая до прекращения поглощения ВЧ энергии, становится как бы продолжением реального электрода, увеличивая его размер. Общее энерговыделение в породе интенсифицируется, так как с ростом размера "электрода" Z_n^2 уменьшается быстрее, чем R_n .

ее электрических свойств и размеров разрушаемых блоков. Рассмотренная задача обобщена для системы нескольких электродов (при $r_3 \leq 0,04h$).

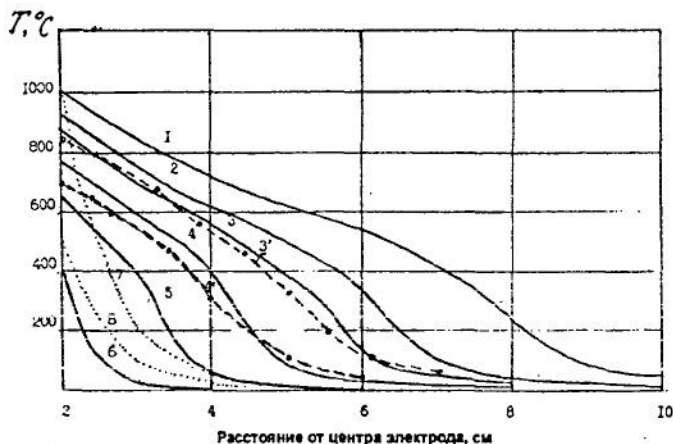


Рис. 1. Распределение температуры в горной породе при различном времени ВЧ воздействия ($r_{эл}=2$ см, $f=5,28$ МГц, $U_{ВЧ}=10$ кВ):

$\text{tg}\delta=0,1e^{0,01T}$: 1 - 100 с; 2 - 72 с; 3 - 50 с; 4 - 30 с; 5 - 18 с; 6 - 8 с (расчет); $\text{tg}\delta=0,1$: 7 - 30 с; 8 - 15 с (расчет); 3' - 50 с; 4' - 30 с (эксперимент - мартито-гематитовый кварцит)

Для случая интенсивного нагрева, когда теплопроводностью породы можно пренебречь и $\text{tg}\delta(T)=\text{tg}\delta_0 e^{\alpha(T-T_0)}$; $\epsilon=\epsilon_n$, получено приближенное аналитическое решение [2], которое представляет интерес с точки зрения понимания физики процесса нагрева породы с зависящими от температуры диэлектрическими свойствами. Интегрируя выражение (1) при $a=0$, найдем $T=T(r, l(\tau))$, где $l(\tau)$ - пока неизвестная функция, к нахождению которой сводится решение задачи. В результате подстановки в $\rho'(T)$ и $\rho''(T)$ функции $\text{tg}\delta(T)=\text{tg}\delta[T(r, l(\tau))]$ находим $\rho'(r, l(\tau))$ и $\rho''(r, l(\tau))$, а затем, интегрируя по r (разбивая участок интегрирования на интервалы с представлением подынтегральных функций в этих интервалах в виде сходящихся рядов), получим $R_n(l(\tau))$ и $X_n(l(\tau))$. После подстановки этих функций в уравнение (2) находим $l=l(\tau)$ в явном виде, а затем $T(r, \tau)$, $R_n(\tau)$, $X_n(\tau)$, $l(\tau)$, $E(r, \tau)$, $P_n(r)$, $\sigma_p(r, \tau)$, $\sigma_r(r, \tau)$ от U , r_3 , f , c_v , ϵ , $\text{tg}\delta_n$, α , T_n .

ходе при нагреве горной породы из материала диэлектрика в полупроводник (в электрическом смысле), достаточно нагретая порода становится как бы продолжением электрода, увеличивая его эффективный размер; увеличивается общая мощность источника без перегрева породы; снижаются активная и реактивная составляющие комплексной электрической нагрузки генератора.

Разработанная математическая модель взаимодействия ЭМ поля ВЧ с породой с учетом изменения ее электрических свойств в процессе нагрева, описывает формирование электрического, температурного полей, термических напряжений и комплексной нагрузки генератора и раскрывает механизм "самозаглубления" ("прорастания") электрода. Задавая размер электрода и параметры электромагнитного воздействия (U и f), можно обеспечить эффективное (высокопроизводительное и низкоэнергоемкое) разрушение без перегрева породы (снижающего термические напряжения). Экспериментальные исследования процесса нагрева и разрушения многих горных пород полностью подтвердили наличие такого явления в породах с изменяющимися при нагреве электрическими свойствами.

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СВЧ ДИАПАЗОНА

Разрушение горных пород в ЭМ поле СВЧ диапазона основывается на процессе диэлектрического нагрева пород в результате поглощения ими энергии ЭМ волны.

Исследования проводились с использованием источников СВЧ энергии в диапазоне волн $\lambda_0 = 0,35 \div 32$ см: при мощности до 50 кВт - в непрерывном режиме и до 200 кВт - в импульсном режиме (до 0,2 с), а также различных типов антенн.

В результате исследований процесс разрушения различных типов горных пород установлено, что в зависимости от их физических свойств и параметров СВЧ-излучения разрушение происходит под действием либо термических напряжений, либо давления пара, образующегося в породе, либо при их совместном действии [31, 33].

Термические напряжения в горной породе возникают вследствие термического расширения породы при ее неравномерном нагреве. Неравномерность нагрева может быть обусловлена как неоднородностью поля СВЧ в породе, так и неоднородностью физических (электрических, тепловых) свойств.

Температурное поле в горной породе при воздействии СВЧ-излучения определяется в общем случае электрическими свойствами породы с учетом их изменения (при нагреве, воз-

Измерения показали, что для ряда горных пород наблюдается изменение ϵ и $\text{tg}\delta$ с повышением температуры. С увеличением частоты ЭМ поля повышается температура начала роста ϵ и $\text{tg}\delta$, а темп роста снижается. Так, для пород типа мартитогематитовых кварцитов [1] на частоте 0,5 МГц начало роста наблюдается при 150°С, а при 13 МГц - при 250°С, дальнейший рост определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \text{tg}\delta(T) &= 0,11e^{0,009(T-150)} && \text{при } T \geq 150^\circ\text{C} && \text{для } f=0,5 \text{ МГц;} \\ \text{tg}\delta(T) &= 0,085e^{0,007(T-250)} && \text{при } T \geq 250^\circ\text{C} && \text{для } f=13 \text{ МГц} \end{aligned}$$

Эта зависимость свойств от температуры существенно влияет на процесс нагрева в поле ВЧ. Выбирая рабочую частоту генератора, можно управлять процессом энерговыделения в породе и прежде всего ее распределением. Поскольку рост ϵ и $\text{tg}\delta$ при нагреве зависит от частоты ЭМ поля (с увеличением частоты скорость роста ϵ и $\text{tg}\delta$ замедляется), то "самозаглубление" электрода с ростом частоты проявляется при более высоких температурах.

Результаты экспериментальных исследований процесса разрушения горных пород с изменяющимися при нагреве электрическими свойствами (типа мартитогематитовых руд и кварцитов, гранитов, гнейсов и др.) в ВЧ поле сопоставлялись с результатами расчетов по предложенной модели процесса нагрева. В конкретных породах (свойства которых использовались при расчетах) были измерены распределения температуры (в разные моменты процесса нагрева), мощности тепловых источников в породе, комплексные нагрузки генератора в процессе разрушения, подтвердившие результаты теоретических исследований с отклонениями, не превышающими 20% (см. рис. 1 и 2).

Экспериментально подтверждено явление "самозаглубления" электрода [8, 15], позволяющее использовать его для интенсификации процесса разрушения при обеспечении низкой энергоемкости разрушения за счет выбора рациональных параметров и режимов ВЧ воздействия на основе учета изменения электрических свойств.

Таким образом, установлено, что в процессе взаимодействия ВЧ-электрического поля с горной породой вследствие роста при нагреве ϵ и $\text{tg}\delta$, наблюдается явление "самозаглубления" электродов, заключающееся в том, что при достижении температуры $T_{\text{пред}}$ (для конкретной горной породы зависит от частоты поля) зона максимальной напряженности электрического поля (зона максимальной мощности удельных тепловых источников) постепенно перемещается от электрода в глубь породы, при этом нагрев породы у электрода практически прекращается, а зона интенсивного нагрева удаляется от электрода. Физическая сущность явления "самозаглубления" состоит в пере-

СВЧ воздействия при проведении исследований процесса разрушения пород с различными свойствами.

Механизм разрушения под действием термических напряжений реализуется в породах с большим значением коэффициента термического расширения α_t и модуля Юнга E , содержащих незначительное количество влаги ($W < 0,1\%$). При таком механизме разрушения в зависимости от распределения температурного поля в породе (соотношения размеров нагретой и холодной зон и положения нагретой зоны относительно свободной поверхности) и достаточном ее нагреве может наступить один из трех видов разрушения: раскол (на несколько кусков), скол (с поверхности), выкол (отделение куска конусообразной формы) [25].

Другим механизмом разрушения горных пород является "взрывной", когда разрушение происходит в основном под действием внутреннего давления пара, образовавшегося в породе при испарении содержащейся в ней влаги. Возможность реализации достаточного для разрушения давления в породе зависит от ее влагосодержания W , массопереносных свойств, а также от длительности процесса нагрева, определяемой электрическими свойствами породы (диэлектрической проницаемостью ϵ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\tan \delta$) и параметрами СВЧ-воздействия (длиной волны λ_0 ; плотностью потока энергии $P_{уд}$, радиусом облучаемой зоны r_n).

Несмотря на термическую природу обоих механизмов разрушения, имеются существенные различия в процессах разрушения, обусловленные тем, что в первом случае напряжения возникают при небольшом относительном увеличении объема твердой фазы горной породы, а во втором - при резком увеличении удельного объема пара в сравнении с удельным объемом воды. Поэтому термические напряжения существенно зависят от деформации породы при разрушении (являясь сильно релаксирующими), а давление пара слабо зависит от деформации породы; разрушение в первом случае происходит без разлета кусков породы, а во втором - сопровождается интенсивным разлетом.

Исследование "взрывного" разрушения проводилось на песчаниках Донбасса, вмещающих угли различных стадий метаморфизма - Ж, К, ОС, ПА, А. Песчаники полевошпатно-кварцевого состава были представлены мелко-, средне- и крупнозернистыми разностями, содержание кварца изменялось от 50 до 80%, цемента от 6 до 30%, по составу цемент был глинистым, глинисто-серицитовым, карбонатным, смешанным, по типу - базальным, поровым, контактно-поровым, соприкосновения и др. Крепость песчаников f изменялась от 6 до 15; влажность в водонасыщенном состоянии - 0,7-2,0%, гигроскопическая влаж-

можной фильтрации влаги и др.) и параметрами электромагнитного поля в породе.

Процессы массопереноса играют важную роль во влаго-содержащих породах, особенно при достижении температур фазового перехода (испарения) и возникновении градиентов температур и давления пара [33].

В случае "сухих" пород теплопроводность может существенно влиять на перераспределение тепла, однако в случае интенсивного нагрева [22, 32] процесс является макроквазиadia-

батическим при выполнении условия $\tau \approx \frac{10^{-2}}{ae'} \left(\frac{\lambda_0 \Delta}{\text{tg}\delta} \right)^2$, где a , e' и

$\text{tg}\delta$ - температуропроводность, относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь породы соответственно; λ_0 - длина электромагнитной волны; Δ - допустимое относительное изменение температуры, не снижающее эффективности процесса нагрева.

Получены распределения во времени температурных полей в породе с зависящими от температуры электрическими свойствами, когда теплопроводностью можно пренебречь [30, 7]. Увеличение коэффициента затухания энергии породы с ростом ее температуры приводит к вытеснению поля к поверхности и ее перегреву, а уменьшение этого коэффициента (например, при высыхании породы) - к перемещению зоны максимального энерговыделения в глубь породы за счет "просветления" поверхностной зоны [30]. В случае сфокусированного излучения СВЧ при постоянстве электрических свойств породы достижение максимального (относительного) энерговыделения в глубине ее возможно для $\epsilon' \approx 4 \div 5$ лишь при $\text{tg}\delta \leq 0,02$; т.е. для слабо поглощающих пород (типа гранита) - на глубине нескольких длин волн в породе от облучаемой поверхности, причем зона максимального энерговыделения располагается не в геометрическом фокусе луча, а существенно ближе к поверхности.

В случае увеличения коэффициента поглощения α при нагреве наблюдается перемещение зоны наибольшего нагрева к поверхности или образование двух локальных максимумов температуры и постепенное их слияние в результате встречного движения. При уменьшении α породы при ее нагреве (сушка породы с миграцией влаги за пределы зоны облучения) происходит смещение зоны максимального нагрева к расположению геометрического фокуса в породе (при больших размерах СВЧ излучателей в сравнении с длиной волны) из зоны, расположенной ближе к поверхности.

Полученные закономерности процесса нагрева породы в СВЧ-поле позволили обосновать выбор параметров и режимов

ность - 0,1-0,45%, коэффициент открытой пористости - 2,5-7,5%, коэффициент абсолютной пористости - 4,7-8,7%.

В результате выполненных исследований получены следующие результаты.

В основе механизма "взрывного" разрушения лежит процесс объемного поглощения песчаником энергии СВЧ-поля, сопровождающийся его нагревом, испарением содержащейся в его цементе влаги, перераспределением ее концентрации по объему, локализацией зон интенсивного поглощения энергии поля на участках повышенной влажности, резкой интенсификацией испарения и возникновением разрушающего давления пара, которое совместно с термическими напряжениями приводит к росту трещин, образованию "шелушек" и их разлету [33].

Основную роль в формировании свойств песчаника, определяющих процесс "взрывного" разрушения, играет цемент (тип, состав, вторичные изменения), который в основном определяет прочностные, массопереносные, электрофизические свойства песчаника, его пористость и влажность. По мере перехода к более высоким стадиям метаморфизма убывает количество и растет прочность цемента, снижаются пористость и проницаемость, уменьшаются влажность (гигроскопическая и насыщенная) и коэффициент поглощения СВЧ энергии. В этом же направлении изменяются свойства при переходе цемента от глинистого к карбонатному и регенерационному.

Влажность породы существенно влияет на процесс разрушения и параметры, обеспечивающие эффективное разрушение. Поскольку пар является рабочим телом, то влажность породы, ее массопереносные свойства и пористость определяют возможность достижения при температурах 200-300°C разрушающих давлений в режиме насыщающих паров ($p_{\text{нас}}=16+86$ атм). Кроме того, количество влаги в значительной мере влияет на коэффициент поглощения, определяя необходимые плотности потока СВЧ-энергии для осуществления процесса. Степень насыщения порового пространства влагой влияет также на процесс массопереноса и крупность продуктов разрушения.

Для разрушения более прочного песчаника необходимо достижение более высокого давления пара внутри пор и трещин. Поскольку $p_{\text{нас}} \approx (t^3/100)^4$ атм, энергоемкость процесса разрушения в эффективном режиме воздействия с увеличением прочности несколько возрастает.

Структура порового пространства определяет пористость и фильтрационные свойства песчаника, которые существенно влияют на процесс разрушения и выбор параметров излучения, обеспечивающих его эффективность. С увеличением коэффициентов пористости и фильтрации при неизменных электриче-

колами а также возрастание их энергоемкости. При дальнейшем увеличении плотности достигается режим устойчивого разрушения $p_{уд \text{ уст}}$, при котором толщина "шелушек", интервалы времени между выколами и энергоемкость процесса остаются постоянными. Дальнейшее увеличение $p_{уд}$ сопровождается уменьшением размеров "шелушек", ростом частоты выколов и снижением энергоемкости процесса.

Энергоемкость процесса разрушения песчаников в центральной части зоны облучения (где $p_{уд}$ максимальное, а блокирование слабое) составляет 80-120 кВт·ч/м³ при $\lambda_0=5$ см и $p_{уд}=400$ Вт/см², а при уменьшении $p_{уд}$ - возрастает. Режим разрушения в центральной части зоны облучения наиболее близок к режиму сплошного разрушения забоя при одновременном равномерном облучении всей его поверхности либо при сканировании луча достаточной мощности по всей поверхности.

Энергоемкость процесса образования щелей составляет 80-120 кВт·ч/м³, однако при дальнейшем разрушении массива в режиме скола крупных "шелушек" на предварительно образованную щель энергоемкость снижается до 50-60 кВт·ч/м³. Исследования [25, 26] подтвердили возможность эффективного разрушения песчаников, вмещающих угли стадий Ж, К, ОС, Т, ПА, А.

Основными факторами, влияющими на разрушение влагонесодержащей породы в СВЧ-поле, являются возникающие термические напряжения и давление пара внутри породы, а также напряжения, обусловленные горным давлением. Распределение первых двух показателей в процессе разрушения породы определяется:

комплексом свойств горной породы (электрических, тепловых, массопереносных, механических - упругих и прочностных);

состоянием породы в массиве (влажность, структура порового пространства, трещиноватость) и горным давлением;

параметрами источника СВЧ излучения (длина волны, распределение плотности потока энергии на поверхности породы, размер зоны облучения) и режимами его воздействия на породу (угол падения излучения, его поляризация, скорость сканирования, изменение потока энергии во времени).

На основе анализа процессов, происходящих в породе, и ее напряженного состояния при СВЧ воздействии, рассмотренная строения песчаника с позиции механики хрупкого разрушения и математической теории трещин получен критерий прочности песчаника как предельное условие, обеспечивающее начало роста трещины [36].

Критерий позволяет определить время и глубину появления такой трещины (в будущем магистральной) в зависимости от

ских свойствах и плотности потока энергии толщина "шелушек" будет увеличиваться (вследствие возрастания роли процесса массопереноса), а при дальнейшем увеличении этих коэффициентов разрушение может прекратиться; для предотвращения этого необходимо увеличить плотность потока энергии.

Электрофизические свойства песчаника определяют процесс распространения электромагнитной волны в нем и его нагрев. Поскольку диэлектрическая проницаемость песчаников изменяется в узком диапазоне значений, основное влияние на коэффициент поглощения СВЧ-энергии оказывает $\operatorname{tg}\delta$. С ростом $\operatorname{tg}\delta$ при постоянной плотности потока энергии увеличиваются скорость нагрева песчаника у поверхности и градиент температуры в приповерхностном слое. Массоперенос при этом играет меньшую роль, поскольку сокращается продолжительность нагрева, обеспечивающего достижение разрушающих давлений, и возрастают термические напряжения.

Длина ЭМ волны определяет скорость нагрева песчаника и градиенты температуры в глубь породы; ее влияние на процесс разрушения противоположно влиянию $\operatorname{tg}\delta$. С ростом длины волны при пропорциональном увеличении удельной плотности потока скорость нагрева у поверхности сохраняется, а градиент температуры уменьшается.

Радиус зоны облучения оказывает влияние на плотность потока энергии, обеспечивающую устойчивый характер разрушения. Если радиус облучаемой зоны в несколько раз превышает глубину проникновения волны, то фильтрация парогазовой смеси будет происходить преимущественно в глубь породы. Если эти размеры соизмеримы, то фильтрация влаги происходит по всем направлениям, поэтому при малой влажности порода разрушаться не будет. Таким образом, при уменьшении облучаемой поверхности плотность потока энергии должна возрастать. С увеличением зоны облучения (при постоянстве других параметров излучения) процесс разрушения происходит более устойчиво и энергоемкость его снижается.

Плотность потока энергии $r_{уд}$ играет важную роль для достижения разрушения песчаника в режиме "взрывного" разрушения и влияет на энергетические и другие показатели процесса [29]. При значениях $r_{уд}$, меньших порогового значения (зависящего от свойств песчаника, длины волны и размеров зоны облучения), разрушение не наступает, происходит лишь нагрев и сушка песчаника, а затем образование трещин в блоке. При плотности потока энергии $r_{уд}$, несколько большем порогового значения, механизм "взрывного" разрушения реализуется, однако, начавшись, может прекратиться; признаком осуществления такого режима является постепенное увеличение толщины "шелушек" и интервалов времени между последующими вы-

указанных выше свойств породы, параметров и режимов воздействия, а также оценить крупность продуктов разрушения и удельную энергоемкость процесса.

Полученные зависимости подтверждены результатами экспериментальных исследований с достаточной точностью (25%) и послужили основой для разработки инженерных методик выбора параметров и режимов СВЧ воздействия и параметров оборудования. Путем их выбора можно управлять процессом разрушения влагосодержащих пород, размерами продуктов разрушения, удельной энергоемкостью процесса разрушения и его устойчивостью.

Так, для пород с $\sigma_{сж} \approx 80$ МПа $q_{уд} \approx 100 \div 110$ кВт·ч/м³, а для пород с $\sigma_{сж} = 1400$ $q_{уд} \approx 140 \div 150$ кВт·ч/м³; если в породе не возникают термоупругие напряжения, то энергоемкость возрастает в 1,15-1,3 раза, а при наличии горного давления ($h = 800 \div 1000$ м) она снижается в 1,1-1,15 раза. Полученные значения $q_{уд}$ являются верхней границей этой величины для случая равномерной плотности облучения (плоская волна) насыщенной влагой породы (когда макромассоперенос практически не реализуется). При учете снижения разрушающего давления пара в процессе роста трещины (периферийные зоны должны слабее нагреваться, так как $T \sim \ell^{1/3}$) и миграции влаги, способствующей более концентрированному выделению энергии (более эффективному ее использованию), удается достичь снижения $q_{уд}$ в 1,25-1,35 раза, т.е. $q_{уд} = 80 \div 120$ кВт·ч/м³.

Экспериментальные исследования процесса разрушения песчаника при воздействии интенсивного СВЧ излучения показали, что зарождение трещины и развитие магистральной трещины происходят в глубине породы, а завершается разрушение выходом ее на поверхность и отделением от массива пластины ("шелушки") круглого или эллиптического сечения максимальной толщины в центральной ее части и утончающейся к краям.

Процесс образования "шелушки" может быть представлен следующими стадиями [26]:

зарождения по глубине породы системы трещин, параллельных свободной поверхности под действием компонентов термических напряжений и горного давления, параллельных забою, а также давления пара в поротрещинах и компонента термических напряжений в направлении, перпендикулярном забою;

роста во времени трещин параллельно забою за счет концентрации напряжений в их вершинах;

увеличения размеров трещин преимущественно под действием давления пара;

образования наиболее быстро растущей магистральной трещины при остановке роста меньших параллельных ей в ре-

зультате их взаимодействия при относительном сближении и миграции пара из мелких трещин в крупные (развивающиеся при меньших давлениях);

неустойчивого развития магистральной трещины параллельно поверхности с последующим выходом ее на забой с $R \approx (3-4)h$ с, отрывом пластины и разлетом ее со скоростью 3-15 м/с.

Если в зоне развития трещины порода недостаточно интенсивно нагревается, окончательное отделение "шелушки" может не наступить; для завершения ее отделения необходимо дополнительное механическое воздействие.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ [4, 5; 9, 11-17, 19-21, 24, 28, 34, 37, 38, 41, 49]

Основными факторами, определяющими разрушение горных пород в интенсивных ЭМ полях ВЧ и СВЧ диапазона, являются термические напряжения и внутрипоровое давление пара во влажных породах, возникающие в результате поглощения энергии поля и ее нагрева.

Достоинствами способов разрушения, основанных на таком воздействии, являются: отсутствие силового механического взаимодействия рабочего инструмента с породой; возрастание эффективности разрушения с увеличением крепости породы; отсутствие (практически) ограничений мощности, подводимой к породе; отсутствие разлета продуктов разрушения, пыли, газовой выделения и шума; безопасность.

На основе электрофизических способов разрушения создаются ресурсосберегающие технологии (снижение энергоемкости разрушения, снижение массы и габаритов оборудования), ведутся исследования по расширению области их применения (разработка новых технологий, расширение типов эффективно разрушаемых пород).

Одним из направлений развития электрофизических способов разрушения является управление процессом разрушения.

Под управлением процессом электрофизического разрушения понимается совокупность мероприятий по решению конкретной технологической задачи разрушения объекта (в заданных горно-геологических и горнотехнических условиях) с учетом требований к продуктам разрушения и сохранению окружающей среды. Сущность управления процессом электрофизического разрушения в общем случае состоит в выборе технологической схемы разрушения и создании в объекте разрушения регулируемого в процессе электромагнитного воздействия распределения источников энергии.

подводное разрушение отдельностей и скальных выступов;

дноуглубительные работы;
направленный раскол блоков;
образование траншей;

проведение выработок различного назначения (см. таблицу).

Анализ распределения термических напряжений [3, 14] в горной породе показал, что в случае использования для ввода ВЧ энергии цилиндрических или сферических электродов, предполагаемых в шпурах, радиальные напряжения $\sigma_r(r)$ на поверхностях отсутствуют, а внутри породы - напряжения сжимающие, максимальные значения (по абсолютной величине) напряжения достигают в зоне энерговыделения. Тангенциальные напряжения $\sigma_\theta(r)$ в зоне интенсивного энерговыделения также сжимающие, а в зоне резкого снижения температуры становятся растягивающими, затем после достижения своего максимального значения убывают в ненагретой зоне пропорционально r^{-2} при цилиндрическом электроде и пропорционально r^{-3} - при сферическом. Растягивающие тангенциальные напряжения играют основную роль в процессе разрушения горной породы, трещины зарождаются в зоне максимальных $\sigma_\theta(r)$, а затем развиваются в радиальных направлениях к внешним границам блока по мере выделения энергии.

С увеличением концентрации энерговыделения максимальные значения $\sigma_\theta(r)$ возрастают, что способствует интенсификации процесса разрушения. Однако чрезмерный рост температуры в зоне нагрева может привести к нежелательным явлениям: возникновению термопластичности породы или чрезмерному увеличению сжимающих напряжений (вызывающих разрушение "рабочей" зоны), снижающих эффективность разрушения. Поэтому для увеличения разрушаемого объема необходимо примерно пропорционально увеличивать объем зоны энерговыделения. Другим фактором, влияющим на величину $\sigma_\theta(r)$, является градиент температуры (крутизна снижения температуры по радиусу) на границе зоны интенсивного нагрева: чем резче снижение температуры, тем при меньших затратах энергии начинается разрушение и зона разрушения ближе к электроду. В случае медленного нагрева породы существенную роль в распределении температуры играет ее теплопроводность, которая приводит к снижению градиентов температуры и уменьшению максимальных значений $\sigma_\theta(r)$ при той же выделенной в породе энергии. Кроме того, зона начала разрушения удаляется от зоны нагрева, что замедляет развитие трещины и снижает эффективность разрушения.

При интенсивном нагреве в ВЧ поле породы с независимыми от температуры электрическими свойствами количество

мещаемые по результатам выполненных исследований

Достоинства	Основные характеристики технических средств	Основные показатели технологии	Реализация
ширение класса пород, повышение производительности, снижение энергоемкости, ликвидация операции бурения, тасность (отсутствие ванных работ, разлета утков разрушения).	ВЧГ: $P_{\text{вч}}=60$ кВт; $f=1,76$; 3,5; 5,28 МГц. ФЛ: $t=6$ м; коаксиал. РИ: навесные передвижные Э. Виброгрокот: $S=2,1 \times 9,7$ м; $R_{\text{двиг}}=2 \times 10$ кВт, частота колебаний: 20+36 Гц; возмущающая сила: 110 кН.	$q=2+10$ кВт·ч/м ³ (а зависимости от свойств породы и степени дробления). Сокращение времени разрушения в 1,8-3 раза (в сравнении с ВЧ). Ликвидация простоев оборудования.	Выполнены исследования, СО. Разработана технология, ОПП в условиях рудников Кривбасса. Получены положительные результаты. Получены А.С. [1, 3-9, 11, 18-21, 41, 43, 44, 46]
крашение объема ручного труда, улучшение гигиенических условий, крашение или ликвидация буровзрывных работ, улучшение качества поности, простота инстнта.	ВЧГ: $P_{\text{вч}}=60$ кВт; $f=5,28$; 13,56; 27,12 МГц. ФЛ: $t=2/2$. Э: линейные (щелевые), штыревые (поверхностные), дисковые или цилиндрические с концентраторами (шпуровые).	$q=3+6$ кВт·ч/м ² Раскол блоков длиной до 2 м, толщиной 0,1-1 м; шели: глубиной 0,6-1,0 см; шпуры: $d=2,5-4$ см; расстояние между шпурами - 10d. Неровность поверхности раскола ± 1 см.	Выполнены исследования, СО, предложена технология. Опробованы в условиях камнеобрабатывающего предприятия. Получен патент. [3, 7, 14, 41, 49]
сутствие разлета пров разрушения ударных, сейсм. воздействия, тасность, возможность ги в непосредственном акте с судами и др. ктами, кратное увеличение производительности.	ВЧГ: $P_{\text{вч}}=60$ кВт; $f=5,28$ МГц. ФЛ: $t=22$ м; 7 м (PK50-24-17)+14 м (PK75-60-51)+2 м (PK50-24-17) РИ: сменные детали (контактная часть и удлинитель) для подстройки нагрузки генератора; повышенная механическая и климатическая стойкость. Подводный буровой инструмент.	Кондиционный объем - 0,1 м ³ Производительность: в воде - 5 м ³ /ч; на суше - 10 м ³ /ч; глубина - до 10 м. Радиус зоны работы установки - 20 м.	Выполнены исследования, разработаны ИТ и ТЗ на комплекс оборудования (ВЧГ, ФЛ, РИ). Разработана технология разрушения. СО. Проведены ГИ технологии и комплекса оборудования. Переданы на вооружение ВМФ 2 установки. Получены А.С. [2, 6, 10-13, 46-48]
сконтактная передача ги. зможность управления ностью продуктов разния.	СВЧГ: $P_{\text{свч}}=50$ кВт; $\lambda_0=5$ см; РИ: эллиптическая антенна $D=1,5$ м, фокусные расстояния: $f_1=0,95$ м и $f_2=1,8$ м	$R_{\text{уд}}=40+10^4$ Вт/см ³ $q=40+120$ кВт·ч/м ³ Отбойка "шелушек" толщиной 0,2+3 см диаметром 1+20 см. Схема и скорость сканирования определяются технологией.	Выполнены исследования механизма, получены закономерности, СО, предложены технологические схемы разрушения. Проведены испытания на стендах в полигонных условиях. Получено А.С. [22-37, 41, 45]
лая энергоемкость и висимость ее от толщи- трываемого слоя. зможность получения ов любых размеров, гегабариты и вес обо- вания.	ВЧГ: $P_{\text{вч}}=60$ кВт; СУ: резонансного типа с подстройкой индуктивности; РИ: система специальных электродов-концентраторов; ФЛ: комбинированная $f=23$ м или повышенной гибкости, надежности и малой массы $f=20$ м (PK75-17-22, $R_{\text{нгр}}=0,20$ м, $m=0,9$ кг/м, $t=-60+200^\circ\text{C}$).	q зависит от схемы разрушения: для полупространства - 40+50 кВт·ч/м ³ ; при одной дополнительной поверхности - 30+45 кВт·ч/м ³ ; при двух дополнительных поверхностях - 25+30 кВт·ч/м ³ . При оконтуривании выработки $q_s=3+5$ кВт·ч/м ² (производительность установки 15+20 м ² /час.	Выполнены исследования. Разработан комплект электрофизического оборудования ВЧГ, ФЛ, СУ, комплекты электродов различного назначения. Проведены НИ оборудования и технологических схем разрушения массива ($f=1+16$) [3, 6, 7, 15, 37, 38, 41, 42]

и ГИ - натурные и государственные испытания соответственно; $R_{\text{уд}}$ - удельная мощность тепловых источников; q и q_s - удельная энергоемкость разрушения объемная и поверхностная соответственно; f - частота электро- нных колебаний.

при одинаковых режимах ВЧ воздействия. На третьем этапе исследования по разрушению "массива" выполнялись на крупных блоках правильной формы однородного мелкозернистого гранита. На них проводились эксперименты с целью выяснения влияния глубины погружения электрода и его контактной части на размеры отделяемых от массива кусков, оценки влияния расстояния от шпура до границы (или границ) блока на характер разрушения, оценки разрушения при одновременном использовании нескольких (2÷6) электродов и влияния предыдущих актов разрушения на последующий при малых расстояниях между электродами, а также оценки возможности образования углублений типа траншеи (канала). При этом результаты оценивались с точки зрения определения рациональных размеров электродов, диаметра и глубины погружения, расстояний до свободных граней между электродами (в одном ряду) и между рядами при одновременном нагреве породы несколькими электродами на характер разрушения: объем, форма зоны выкола, размеры продуктов разрушения.

Были получены следующие результаты:

в случае интенсивного энерговыделения вокруг сферического электрода, погруженного в массив, происходит отделение в сторону свободной поверхности части породы конической формы с углом при вершине $90-120^\circ$ (вершина в центре электрода), если центр электрода расположен от поверхности на глубине, более чем в 1,5 раза превышающей радиус зоны нагрева; в противном случае в массиве образуются трещины, перпендикулярные к поверхности и проходящие через центр зоны нагрева;

при электроде цилиндрической формы, погружаемом в полупространство, происходит отделение конуса с углом при вершине $150-160^\circ$; при размещении такого электрода в блоке породы в ней возникают система радиальных трещин (проходящих через шпур) и выколы конусов в направлении ориентации электрода;

при погружении в массив электрода дискообразной формы (цилиндрическая контактная поверхность и малая высота электрода) в зоне $R \approx h$ (глубина погружения) образуется плоская трещина, параллельная свободной поверхности, в дальнейшем она начинает отклоняться к поверхности, а для электродов эллипсоидной формы разрушение начинается возле точек поверхности электрода, наиболее удаленных от его центра, где реализуются наибольшие напряженности электрического поля;

при использовании линейных электродов (цилиндрических, полосовых и др.) трещины проходят через линию их размещения в породе, а в случае расположения их в одной плоскости трещина развивается в этой же плоскости;

выделяемой в приэлектродной зоне энергии ограничено, поэтому увеличение разрушаемого объема возможно лишь путем увеличения размеров электрода (длины и диаметра). При нагреве породы с зависящими от температуры электрическими свойствами нагреваемый объем возрастает в результате "самозаглубления" электрода; выбором рациональной частоты поля обеспечивается крутой фронт температуры в породе без ее перегрева, т.е. эффективное разрушение больших объемов возможно при относительно малых размерах электродов [3].

Полученные закономерности процесса формирования полостей термических напряжений в породе в зависимости от параметров энерговыделения (мощность источника и его распределение в породе, а также режим энерговыделения) позволили обосновать выбор параметров ЭМ воздействия, параметров ВЧ облучения и технологических параметров (см. таблицу).

Задача разрушения скального массива на основе использования ВЧ контактного способа является новой задачей, поэтому натурному эксперименту предшествовала стадия лабораторных исследований с целью выяснения возможности достижения разрушения, оценки влияния параметров и режимов ВЧ воздействия, а также технологических параметров, конструктивных параметров электродов, их расположения (взаимное и в массиве) на развитие трещины и эффективность процесса. Поскольку процесс разрушения пород в интенсивном ВЧ поле представляет собой несколько одновременных и взаимосвязанных процессов (развитие электрического поля в породе, поля тепловых источников, поля температур и термических напряжений, развитие трещин), то для осуществления масштабного моделирования в лабораторных условиях обеспечивалось подобие каждого из этих процессов.

При проведении экспериментальных работ по моделированию ВЧ разрушения массива использовались специально разработанные стенды ($P_{\text{вч}}=25\div 60$ кВт, $f=5,28\div 27$, 12 МГц, $U_{\text{вч}}\leq 8$ кВ). На первом этапе исследований для качественной оценки характера развития трещин и влияния на него ряда факторов (глубина шпуров, диаметр электрода, форма контактного участка, влияние границ образца) с целью исключения влияния неоднородности материала использовались специальные блоки оптического стекла (хрупкого и весьма чувствительного к термическим напряжениям). На следующем этапе исследований изучался комплекс свойств (электрических, тепловых, механических) образцов гранитов реального массива предполагаемых участков проведения натурных испытаний (полигон "Рапакиви") и на образцах моделирующей горной породы (граниты Каменногорского и Янцевского месторождений) и была выполнена серия экспериментов по оценке разрушаемости образцов этих пород

Управление процессом электрофизического разрушения базируется на познании основных закономерностей процессов, происходящих в горных породах в интенсивных электромагнитных полях:

- формирования электрического поля в породе с учетом ее электрических свойств и их изменения;

- формирования поля удельных тепловых источников и поля температур;

- формирования во времени поля термических напряжений с учетом тепловых и деформационных свойств породы;

- тепло-, массопереноса и формирования поля давления пара в породе с учетом массопереносных свойств породы;

- развития трещин в породе под действием термических напряжений, давления пара, горного давления и дополнительных механических нагрузок с учетом прочностных свойств породы.

Управление процессом разрушения при ЭМ воздействии на породу осуществляется путем:

- выбора выходных параметров генератора, регулирования режимов его работы и согласования;

- выбора параметров линии передачи энергии и режима ее работы;

- выбора конструкции, параметров согласующего устройства и его регулирования;

- выбора и применения рабочих инструментов конкретной формы, размеров и конструкции;

- выбора расположения в горной породе зон интенсивного энерговыделения;

- создания системы взаимодействующих рабочих инструментов, обеспечивающих направленное развитие трещины;

- выбора параметров и режимов работы излучающих устройств;

- выбора параметров излучения и режимов ввода энергии в породу;

- регулирования распределения напряжения в системе рабочих инструментов;

- учета влияния горного давления при выборе технологических схем разрушения;

- создания в породе концентраторов механического напряжения и напряженности электрического поля;

- применения схем воздействия, обеспечивающих разрушение под действием растягивающих напряжений.

Такое управление процессом разрушения позволило создать эффективные невзрывные технологии разрушения крепких и абразивных горных пород для решения следующих задач:

применения нескольких электродов эффективно, когда их электрическое и тепловое взаимодействие мало, а механическое (термическое напряжение) существенно.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований сформулирована концепция повышения эффективности разрушения горных пород при использовании ЭМ энергии ВЧ диапазона, основные ее положения сводятся к следующему:

разрушение при ЭМ воздействии должно реализовываться преимущественно под действием растягивающих напряжений, формируемых в зоне, где практически отсутствуют тепловые источники;

относительный объем зоны сжимающих напряжений (интенсивного нагрева) должен быть минимально возможным (0,5-2% общего разрушаемого объема), а температура нагрева ее максимально возможной, но не превосходящей температуры проявления пластичности или температуры, при которой сжимающие напряжения превышают прочность породы в нагретой зоне; для каждой породы с учетом ее свойств можно определить минимальную удельную энергоемкость разрушения и соотношение объемов сжатия (нагрева) и растяжения;

градиент температуры на границе зоны интенсивного (основного) энерговыделения должен быть достаточно большим для зарождения трещин вблизи зоны нагрева и развития их к периферии, это достигается выбором размера и формы электрода, а также при высокой скорости нагрева (теплопроводность практически не влияет на распределение температуры);

для достижения эффективного (малозатратного) разрушения зоны интенсивного энерговыделения должны формироваться внутри (не на поверхности) объекта разрушения, что достигается погружением рабочего инструмента в шпур (щель) или (в зависимости от особенностей электрических свойств породы) или путем образования канала пробоя, "самозаглубляющегося" электрода, тепловых неоднородностей фокусированным излучением или электрических неоднородностей в породе в результате процесса массопереноса влаги и последующего выделения энергии в этих неоднородностях;

снижение энергоемкости разрушения и управление разрушением (вид разрушения, направленность трещин) осуществляются: созданием системы взаимодействующих (полями механических напряжений) зон энерговыделения в породе, действующих одновременно или в определенной последовательности ("движущихся" источников); применением концентраторов электрического поля и электродов специальной формы для создания зон нагрева (распределения термических напряжений) заданной

Способы разрушения и технические средства,

Способ разрушения	Основные операции	Идеи	Область применения	
			Технологии	Породы
Комбинированное электротермомеханическое разрушение отдельных (ВЧ+виброудары).	Последовательное воздействие: ВЧ - для образования начальных трещин и виброударное - для завершения разрушения.	"Самозаглубление" электрода. Высокая эффективность ВЧ воздействия на начальных стадиях разрушения и механического - на заключительных стадиях.	Поточные технологии (открытые и подземные условия): забой карьеров, перед дробилками, дробление валунов.	Крепкие и средней крепости, в т.ч. повышенной пластичности и сложной структуры, с изменяющимися при нагреве электрическими свойствами.
Направленное ВЧ разрушение блоков	Нарезание алмазным диском шелей в плоскости предполагаемого раскола, размещение в них однополярного электрода, ВЧ воздействие. То же с использованием поверхностных и шпуровых электродов.	Управление развитием трещины путем создания концентраторов электрических и механических напряжений. Использование однополярного электрода для предотвращения электрического пробоя.	Разделка блоков в карьере и заводских условиях, получение бордюрного камня, брусчатки и "равного" камня, отбойка блоков от массива.	Крепкие породы месторождений природного камня: граниты, гранодиориты, гнейсы, габбро, лабродориты, кварциты.
Подводное ВЧ разрушение отдельных и скальных выступов.	Последовательное отделение кусков заданного размера путем бурения водолазом системы шпуров в объекте разрушения, установка в шпурах РИ, вытеснения из них воды сжатым воздухом и ВЧ обработка объекта.	Заглубленный электрод, обеспечивающий раскол или откол. Вытеснение воды сжатым воздухом. Комбинированная фидерная линия. Второй электрод - вода. Согласование - сменным инструментом.	Аварийно-спасательные работы (снятие судов с мели), дноуглубительные работы, расчистка форватера, подводно-технические работы.	Крепкие породы различных литотипов в водной среде.
СВЧ разрушение влагосодержащих пород в массиве ("взрывное" разрушение) и комбинированное (СВЧ+мех. воздействие).	Обработка массива осуществляется сканированием СВЧ - "луча" по забою. Различные варианты обработки массива: послеполное разрушение; нарезание шелей и разрушение целиков (возможно механическим воздействием).	Эффект "взрывного" разрушения. Управление процессом разрушения: переменная мощность, повышение скорости нагрева, квазиадиабатический режим, учет комплекса свойств горной породы.	Проведение работ различного назначения, разрушение или обработка объектов из бетона, разделение пород с различными свойствами компонентов (избирательный нагрев).	Влагосодержащие породы ($W > 0,2\%$) типа песчаника, аргиллита, алевролита, бетона.
ВЧ разрушение массива отрывом.	Предварительное оконтуривание предполагаемой выработки или создание дополнительных свободных поверхностей (алмазный диск, строчное бурение) и ВЧ обработка системой электродов, размещаемых в шелях или шпурах.	Разрушение массива растягивающими напряжениями путем использования РИ (системы Э), для концентрированного выделения энергии в породе с целью формирования заданного направления развития трещин.	Проведение работ различного назначения (стволов, квершлага, траншей, подземных сооружений, тоннелей), подготовка оснований при строительстве, взрывные работы (создание концентраторов для повышения эффективности).	Породы выше средней крепости и любой абразивности.

Условные обозначения к таблице: ВЧ и СВЧ - высокая и сверхвысокая частота соответственно; ВЧГ и СВГ - генератор электромагнитной энергии ВЧ и СВЧ диапазона соответственно; ФЛ - фидерная линия; СУ - со- сущее устройство; РИ - рабочий инструмент; Э - электрод; ИТ - исходные требования; ТЗ - техническое ние; СО - создано оборудование; ОПП - опытно-промышленная проверка;

конфигурации; заданием взаимного расположения электродов и относительно свободных поверхностей объекта разрушения.

При СВЧ воздействии удельная технологическая энергоемкость разрушения определяется общими затратами ЭМ энергии, выделяющейся в массиве. Этот показатель учитывает энергию, идущую на нагрев породы как в зоне разрушения, так и в соседних зонах, где разрушение не реализовалось, поэтому величина его существенно зависит от распространения волны в породе, т.е. от параметров СВЧ воздействия (длины ЭМ волны, условий фокусировки излучения, положения фокуса в породе, излучаемой мощности), свойств породы (электрических, фильтрационных, влажности) и технологической схемы обработки массива.

В результате выполненных исследований определены следующие пути снижения энергоемкости СВЧ разрушения [26, 29, 34]:

воздействие на породу потоком энергии сначала с малой плотностью (при этом происходит миграция влаги в глубь породы, где повышается ее концентрация и возрастает поглощение СВЧ энергии), а затем с увеличенной в несколько раз плотностью для обеспечения интенсивного локализованного нагрева влаги, ее быстрого испарения и повышения давления пара, обеспечивающего разрушение с образованием крупных "шелушек";

увеличение коэффициента использования энергии за счет повышения плотности потока энергии в луче (путем увеличения излучаемой мощности, улучшения фокусирования) и уменьшения длины волны;

сканирование луча по забою для реализации оптимальных температурных полей;

выбор направленности луча на забой, при которой основная доля энергии выделяется в направлении желаемого разрушения;

создание на забое дополнительных свободных поверхностей (щелей) с последующим отделением от них крупных кусков породы;

осуществление разрушения в режиме квазиadiaбатического нагрева, при котором ЭМ энергия выделяется практически лишь во влагосодержащем цементе и за время разрушения тепло не успевает распространиться в зерна обломочного материала (не поглощающие практически ЭМ энергии), в таком режиме интенсивного нагрева ($\rho_{уд}=10 \div 10^2$ кВт/см³, $\tau_p \approx 10^{-2} \div 10^{-4}$ с) энергоемкость разрушения снижается в несколько раз.

Лабораторные и полигонные исследования, выполненные на песчаниках (с различными электрическими, массопереносными, механическими свойствами и влажностью) с использова-

нием СВЧ источников: в диапазоне $\lambda_0=32\pm 1,5$ см, $P_{\text{свч}}\leq 50$ кВт, $\rho_{\text{пад}}\leq 500$ Вт/см² - в непрерывном режиме и $\lambda_0\approx 0,35$ см $P_{\text{свч}}\leq 200$ кВт, $\rho_{\text{пад}}\leq 40$ кВт/см², $\tau\leq 0,2$ с - в импульсном режиме, подтвердили, что удельная технологическая энергоёмкость снижается с 80-200 до 50-60 кВт·ч/м³, а в режиме квазиadiaбатического разрушения до 40-50 кВт·ч/м³.

Для решения конкретной технологической задачи с учетом свойств породы и требований к продуктам разрушения, сохранности массива и др. выбирается конкретная технологическая схема разрушения.

При использовании энергии СВЧ поля для проведения выработок по песчаникам угольных месторождений в зависимости от свойств породы и состояния массива (влажность, нарушенность, напряженное состояние) рекомендуются следующие технологические схемы разрушения [28]:

оконтуривание выработки с последующим сканированием сфокусированного луча по забою (или его части) в режиме максимальной плотности потока энергии ($\rho_{\text{пад}}>400$ Вт/см² при $\lambda_0\approx 5$ см) с образованием мелких продуктов разрушения ($r<0,1$ см) - для пород с большим количеством трещин, неоднородностей, а также при малой влажности (0,2-0,3%) и повышенной фильтрационной способности пород;

сканирование по забою вертикально поляризованного луча, сфокусированного на его поверхности и направленного к ней под углом Брюстера; при этом обеспечивается первоначально малый темп нагрева породы для испарения влаги в поверхностном слое и последующий высокий темп нагрева, при котором происходит низкоэнергетическое разрушение с образованием крупных "шелушек" для песчаников с повышенной влажностью (более 0,5%);

образование на поверхности забоя параллельных "щелей" (глубина 20-25 см и средняя ширина 8-10 см) при высоких плотностях энергии и последующее разрушение целиков (со средней шириной 10-15 см) в режиме их раскола - для крепких ($\sigma_{\text{сж}}>100$ МПа) песчаников.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ЭМ ПОЛЯХ

Существенной особенностью способов разрушения, основанных на использовании ЭМ энергии, является создание разрушающих напряжений в самой горной породе при отсутствии силового механического взаимодействия ее с рабочим инструментом.

Отсутствие необходимости создавать напорные усилия позволило резко снизить металлоёмкость и габариты оборудо-

вания, а отсутствие (практически) износа рабочего инструмента (существенного в традиционных горных машинах) - значительно снизить затраты на материалы.

Основными техническими средствами, обеспечивающими реализацию ВЧ контактного разрушения, являются ВЧ генератор, фидерная линия, согласующее устройство и рабочий инструмент. Их выбор определяется прежде всего решаемой технологической задачей (разрушение отдельностей, направленный раскол, подводное разрушение, разрушение массива и др.), заданной производительностью, свойствами разрушаемых пород, условиями выполнения работ.

Рабочий инструмент (РИ) при ВЧ контактном разрушении горных пород - это устройство, обеспечивающее подвод ВЧ напряжения к горной породе, в его состав входят детали, осуществляющие непосредственный контакт инструмента с породой (контактная часть электрода) и проводник (не контактирующий с породой) с центрирующими и стыковочными (с фидером или согласующим устройством) деталями. Основной функцией РИ является ввод в определенный объем породы за заданное время энергии, достаточной для осуществления конкретного вида разрушения некоторого объема породы. Форма и размеры контактной части электрода (рабочего инструмента), его размещение в породе совместно с параметрами ЭМ воздействия (частота поля и напряжение на электроде) и электрическими свойствами породы определяют распределение выделяющегося тепла в приэлектродной зоне и комплексную электрическую нагрузку генератора, характер разрушения и его эффективность (удельная энергоемкость, крупность продуктов разрушения).

Полученные на основе теоретических и большого объема экспериментальных исследований закономерности энерговыделения, формирования термических напряжений и развития разрушения породы при ВЧ воздействии с использованием электродов различных форм и размеров контактной части и при различном расположении электродов в породе (взаимном и относительно свободных поверхностей) позволяют обоснованно подойти к выбору типа электрода и его параметров в зависимости от решаемой технологической задачи и с учетом следующих требований.

Для эффективного использования энергии, выделяющейся в приэлектродной зоне (для предотвращения нагрева периферийных участков), радиус сферического электрода должен быть не более 0,06 радиуса разрушаемого блока, а для цилиндрического электрода - не более 0,03 радиуса блока.

Максимальная температура $T_{\text{макс}}$ в приэлектродной зоне не должна превышать некоторой величины для конкретной породы, при которой снижается эффективность роста термических

напряжений в результате проявления термопластичности или разупрочнения зоны нагрева под действием термических напряжений.

Темп энерговыделения (мощность) в приэлектродной зоне должен быть достаточно большим, чтобы выполнялось условие квазиadiaбатичности, т.е. чтобы за время ВЧ воздействия перераспределением тепла в породе можно было пренебречь (при этом не происходит снижение термических напряжений).

Основной деталью электрода является его контактная часть, определяющая зону энерговыделения в породе и распределение удельной мощности в этой зоне. Анализ электрических полей и создаваемых ими термических напряжений позволил определить ряд перспективных вариантов конструкций электродов для осуществления различных схем разрушения. Были опробованы различные варианты конструкции контактной части шпурового электрода, в которых контакт с горной породой осуществлялся по всей поверхности шпура, в нижней придонной его части высотой 1-2 диаметра шпура, по кольцевой зоне шпура высотой 0,1-0,5 диаметра на любой глубине, а также предыдущие варианты с дополнительными контактными элементами, расположенными по образующим шпура (две диаметрально расположенные полосы протяженностью 1-2 диаметра электрода и шириной 0,1-0,2 диаметра), по кольцевой "деформированной" поверхности шпура (заключенной между двумя параллельными плоскостями, проходящими под углом 45-60° к оси шпура) высотой 0,2-0,3 диаметра, по полукольцевой поверхности шпура (высотой 0,1-0,5 диаметра) с концентраторами по образующим шпура и др. [38]

При проведении испытаний были опробованы как одиночные электроды различной конструкции, так и комбинации нескольких электродов одинаковой и различных конструкций. При использовании щелевого электрода варьировалась его форма (сечение), протяженность, положение его в щели и режимы ВЧ-нагружения.

Выполненные эксперименты по разрушению массива с использованием макетов электродов различной конструкции позволили обосновать выбор рациональных конструкций при создании полноразмерных экспериментальных образцов рабочего инструмента [16, 47, 48, 49].

Рабочая часть электрода, находясь в контакте с породой, формирует электрическую нагрузку генератора $Z_n = R_n - jX_n$ (Z_n - комплексная электрическая нагрузка, R_n и X_n - активная и реактивная составляющие), зависящую от электрических свойств породы, конструктивных параметров электрода и его расположения относительно объекта воздействия. Электрическая нагрузка определяется либо расчетным путем [3, 6] на основе рас-

смотрения электрических полей для конкретных конфигураций электродов с учетом электрических свойств (измеряемых в слабых полях), либо по экспериментально установленным $I(r)$, $U_n(r)$, $P_n(r)$ в процессе разрушения, либо специально разработанным устройством-измерителем комплексной нагрузки в диапазоне 5,28 МГц.

Согласующее устройства (СУ) совместно с рабочим инструментом должно обеспечивать согласование электрической нагрузки (породы) с электрическими параметрами фидерной линии, при котором осуществляется эффективный ввод энергии в породу и благоприятный режим работы высокочастотного генератора и фидерной линии.

Определив диапазон изменения нагрузки в процессе разрушения, можно выбрать рациональную схему согласующего устройства. Наиболее надежной в работе, простой в исполнении и решающей поставленные задачи при передаче энергии является схема с использованием в качестве подстроечных элементов: параллельно нагрузке подключенной добавочной емкости C_d и последовательно к ним (Z_n и C_d) подключенной индуктивности L_d . В качестве C_d используются конструктивные элементы электрода или отрезки кабеля, а в качестве L_d - катушка индуктивности с регулируемым числом витков. Суть согласования сводится к достижению в линии в процессе разрушения режима приближенного согласования, когда волновое сопротивление

линии $\rho_v \approx R_n \left(\frac{C_n}{C_n + C_d} \right)^2$, а $L_d \approx \frac{1}{4\pi^2 f^2 (C_n + C_d)}$, т.е. осуществ-

лению последовательного резонанса. В таком режиме удастся в несколько раз повысить напряжение на электроде (в породе) по сравнению с напряжением в линии (на выходе генератора) и осуществить режим передачи энергии фидером при малом КСВ (коэффициенте стоячей волны).

Как показали эксперименты, эта схема обеспечивает хорошее согласование линии с нагрузкой в течение всего процесса разрушения, что позволило создать фидерную линию на основе использования нового типа кабеля РК 75-17-22 (с фторопластовой ленточной изоляцией), обладающую повышенной гибкостью, малой массой и обеспечивающую передачу в породу до 60 кВт в непрерывном режиме (до 100 кВт - при работе в воде) на рабочей частоте $f=5,28$ МГц.

По установленным энергетическим показателям разрушения и требуемой производительности технологического процесса определяются основные энергетические параметры оборудования: колебательная мощность генератора, а с учетом КПД источника - потребляемая из сети мощность.

Исходя из мощности генератора и мощности, передаваемой по фидеру с учетом режима его работы (КСВ, определяемый степенью согласования электрических параметров нагрузки с волновым сопротивлением фидера), можно найти количество фидеров, подключаемых параллельно к выходу генератора. Количество подключаемых к одному фидеру РИ определяется отношением мощности, передаваемой по фидеру, к мощности, подводимой к породе отдельным ВЧ рабочим инструментом (в рациональном режиме работы).

Рабочая частота генератора определяется возможностью выделения в породе рабочим инструментом мощности, необходимой для эффективной реализации технологического процесса разрушения горной породы. Требования к генератору по диапазону согласования с нагрузкой определяются диапазоном изменения нагрузки в процессе разрушения, параметрами согласующего устройства и фидерной линии.

Основные характеристики технических средств, рекомендованных в результате выполненных исследований и созданных для различных технологий разрушения, приведены в таблице.

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Комбинированное (электромеханическое) разрушение горных пород [4, 5, 9, 20, 21, 43]. Электротермомеханический способ разрушения отдельностей основан на последовательном воздействии на горную породу ВЧ поля для создания трещин и механическом для их прорастания и окончательного разделения куска породы на части (габаритного размера). При проведении опытных работ по разрушению руд и вмещающих пород Кривбасса ВЧ способом было установлено, что не все типы пород разрушаются достаточно эффективно: в породах с повышенной пластичностью и сложной структурой окончательное разрушение негабаритов (разделение на части) не наступало или процесс существенно замедлялся; для завершения разрушения достаточно применить дополнительно механическое воздействие.

Первые шахтные испытания разрушения с применением комбинированного воздействия проводились на грохоте опрокидывателя шахты "Большевик" в Кривбассе. В результате опробования различных схем сочетания электрического и механического воздействий был сделан вывод о целесообразности применения виброударного воздействия для завершения разрушения. В дальнейшем испытания были продолжены на шахте им. Фрунзе. При проведении работ использовалась ВЧ установка ($P_{вч}=40$ кВт, $U \leq 10$ кВ, $f=1,57; 3,5; 5,28$ МГц). Установка разме-

гранитов этого месторождения $4\div 7$ кВт·ч/м². Такой режим энергоснабжения (без факеления) достигался при напряжении на электродах до 6 кВ и частоте 5,28 МГц.

Испытания на полигоне "Рапакиви" ВЧ оборудования и различных схем ввода ВЧ энергии в породу для направленного раскола крупных блоков (объемом до 3 м³ и толщиной до 1 м) показали, что предпочтение заслуживает схема с использованием цилиндрических электродов с концентраторами, которые размещаются в шпурах, пробуренных в плоскости предполагаемого раскола. Глубина шпуров, достаточная для раскола, не превышает 1/3 толщины блока, а расстояние между шпурами - $8\div 10$ диаметров электрода. Для разрушения плит малой толщины (до 20 см) с "рваной" поверхностью и неправильной формы перспективна схема с использованием поверхностных штыревых (подпружиненных) электродов, размещаемых по прямой линии на одной грани и линейного (жесткого, касающегося блока в отдельных точках) электрода - на противоположной грани.

Доказана возможность осуществления эффективного направленного раскола блоков в заводских условиях и камнедобычного карьера, подтверждена надежная работа оборудования. Дальнейший прогресс этого направления может быть достигнут на основе совершенствования конструкции электродов и создания ВЧ генераторов повышенной мощности (до 200 кВт) для раскола крупных блоков (объем более 3 м³) и отбойки блоков от массива.

Подводное ВЧ разрушение отдельностей и скальных выступов [10, 13, 14, 41, 47, 48]. Опытные работы по подводному разрушению горных пород в натурных условиях (Ладожское озеро, Балтийское море) проводились в несколько этапов. На первом этапе оценивались принципиальная возможность осуществления подводного разрушения различных типов горных пород с использованием энергии ВЧ поля и конструктивные решения, положенные в основу создания рабочего инструмента; опробовались различные варианты передачи энергии к горной породе. В результате испытаний была подтверждена эффективность процесса подводного разрушения, уточнены режимы работы ВЧ генератора, выявлены ограниченные возможности использования серийных типов кабелей для подводной передачи энергии к породе.

На втором этапе натурных испытаний были опробованы различные варианты передачи энергии на большие расстояния (до 25 м) на основе использования специального кабеля повышенной мощности (РК 75-75-51), подтверждена возможность разрушения скальных выступов; испытывались различные технические решения, обеспечивающие повышение надежности работы оборудования и рабочего инструмента, обрабатывались

нием "щелей" и последующим разрушением целиков (при СВЧ или механическом воздействии).

Для реализации схемы послойного разрушения луч сканировался по поверхности забоя. Наклонное падение луча на поверхность породы создавало благоприятный режим воздействия на забой: первоначально малой плотностью энергии с последующим резким увеличением плотности до максимальной. При этом в результате миграции влаги вглубь породы образовывались крупные "шелушки", толщина снимаемого слоя за один проход составляла $5 \div 10$ см, а удельная энергоёмкость разрушения - $50 \div 60$ кВт·ч/м³.

Опробование схемы с образованием "щелей" (глубиной до 20 см и шириной $10 \div 15$ см) с образованием целиков (шириной $15 \div 20$ см) показало, что последние могут быть эффективно разрушены в режиме СВЧ раскола с энергоёмкостью $10 \div 20$ кВт·ч/м³, а общая энергоёмкость составила $50 \div 60$ кВт·ч/м³. При разрушении целиков с использованием ударных устройств общая энергоёмкость не превышала $40 \div 50$ кВт·ч/м³.

На стендах ИПФ и ИАЭ им. И.П.Курчатова выполнены экспериментальные исследования процесса разрушения при плотности потока энергии до 40 кВт/см² при $\lambda_0 = 0,35$ см и длительности импульса до $0,1$ с, при этом удельная энергоёмкость составила в режиме сплошного разрушения $40 \div 50$ кВт·ч/м³.

В результате выполненных испытаний доказана возможность эффективного разрушения широкого класса углевмещающих пород (песчаников, аргиллитов, алевролитов); существенное снижение энергоёмкости разрушения достигается в результате реализации рациональных технологических схем разрушения и режимов воздействия.

ВЧ разрушение массива [15, 37, 38, 41, 42]. Натурные испытания ВЧ способа разрушения проводились на скальном массиве месторождения "Рапакиви" и ПОГК "Кузнечное" ($\sigma_{сж} = 120 - 160$ МПа).

На начальной стадии испытаний на основе опробования различных схем передачи ВЧ энергии горной породе была показана принципиальная возможность реализации разрушения массива, получены данные, характеризующие этот процесс (энергоёмкость, размеры продуктов разрушения) и режимы работы оборудования. Результаты этих испытаний позволили наметить пути совершенствования технологических схем разрушения и определить технические мероприятия по адаптации разработанного ранее оборудования для решения поставленной задачи.

На последующих стадиях испытывались различные схемы реализации шпурового способа разрушения массива с исполь-

частичном оконтуривании разрушение блоков по плоскостям, перпендикулярным свободной поверхности, производится с помощью шпуровых комбинированных электродов.

Экспериментально показана также возможность разрушения массива с отделением блоков размером 45х45 см (без бурения шпуров) с использованием для подвода энергии протяженных электродов размещаемых по дну оконтуривающей щели.

Проведенными натурными испытаниями доказана возможность эффективного послойного разрушения породного массива; такой способ разрушения перспективен для решения различных технологических задач: проведение выработок различного назначения (траншеи, стволы, квершлаг); подготовка скального основания для строительства; дноуглубительные работы. Суммарная удельная объемная энергоемкость разрушения (с учетом затрат на нарезание щелей) составила $25 \div 30 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ (при глубине щелей 22 см). Подтверждена надежность разработанного оборудования: ВЧ генератора, фидерной линии, согласующего устройства, шпуровых электрофизических рабочих инструментов различной конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представленной в виде научного доклада, изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов взаимодействия электромагнитных полей высокочастотного и сверхчастотного диапазонов с горными породами, и дано решение актуальной научно-практической задачи, завершившееся разработкой невзрывных экологически чистых способов и новых технических средств разрушения пород высокой крепости и абразивности для различных технологических задач. Основные выводы, научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Установлено, что определяющее влияние на процесс разрушения горных пород в ЭМ полях оказывают изменяющиеся в процессе взаимодействия свойства пород, которые задают пространственно-временные распределения в породе энерговыделения, температуры, термических напряжений и давления пара.

2. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель процесса нагрева в ВЧ поле горной породы с зависящими от температуры электрическими свойствами; на ее основе получены аналитические и численные решения, описывающие развитие в породе электрического и температурного полей, формирование термических напряжений и разрушение в зависимости от параметров воздействия.

щалась вблизи перепускного люка, над ним монтировался специально разработанный виброгрохот. Шарнирно закрепленный высокопотенциальный электрод мог устанавливаться на раскалываемый негабарит в любом месте грохота, вторым электродом служили заземленные колосники виброгрохота. Напряжение к электроду подавалось по коаксиальному кабелю. Управление ВЧ установкой и виброгрохотом осуществлялось с выносного пульта. Горные породы были представлены мармитовыми рудами, роговиками, джеспилитами различной крепости. Длительная опытно-промышленная эксплуатация установки подтвердила эффективность комбинированного способа разрушения: в 1,8÷3 раза сократилась продолжительность разрушения; в среднем в 2 раза снизилась удельная энергоемкость разрушения; значительно повысилась эффективность вторичного дробления благодаря увеличению количества образующихся кусков породы (степени дробления) и разрушению пород с повышенными пластическими свойствами. Выданные по результатам испытаний рекомендации на применение комбинированного разрушения были использованы в дальнейшем при разработке технологии выпуска руды в шахтах КМА.

Направленный раскол блоков [14, 41, 49]. Экспериментальная проверка технологии направленного раскола блоков осуществлялась в условиях камнеобрабатывающего завода (ПОГК "Кузнечное") и полигона 26ЦНИИ МО РФ (месторождение "Рапакиви").

Подвод ВЧ энергии от генератора ($P_{вч}=60$ кВт, $f=5,28$ МГц) по фидеру к породе для ее локального нагрева с целью раскола осуществлялась с помощью высокопотенциального электрода-проводника, расположенного в щелях, нарезанных (с использованием камнерезного станка с алмазным инструментом) на гранях блоков правильной формы в плоскости предполагаемого раскола. Вторым (заземленным) электродом являлась металлическая пластина, над которой на диэлектрической прокладке размещался разрушаемый блок. При проведении испытаний были опробованы различные системы создания щелей для размещения электродов: двух параллельных щелей на противоположных больших гранях блока и замкнутой щели по контуру предполагаемого раскола блока.

Испытания на заводе ПОГК "Кузнечное" показали, что блоки различной толщины (8÷40 см) и длиной до 1,2 м при размещении проводников в щелях глубиной 0,6÷1,2 см и шириной 0,4÷0,6 см эффективно раскалываются на полосы шириной не менее 0,3 толщины блока. Лучшие результаты получены при замкнутом (по 4 граням) оконтуривании блока; удельная погонная мощность, выделяемая в породе, составила 100÷200 Вт/см, время разрушения 2÷4 мин, удельная энергоемкость раскола

вопросы согласования работы генератора с породой как электрической нагрузкой (оконечные устройства рабочего инструмента).

На третьем этапе испытаний отрабатывались различные технологические схемы разрушения скальных выступов, схемы и режимы согласования генератора с нагрузкой, испытаны экспериментальные образцы РИ усовершенствованной конструкции (повышенной надежности и со сменными оконечными устройствами) и макет разработанной комбинированной фидерной линии (повышенной гибкости и обеспечивающей передачу в нагрузку до 60 кВт ВЧ энергии при КСВ $\leq$ 15), удовлетворяющей требованиям заказчика.

В результате выполнения ИГД им. А.А.Скочинского совместно с ВНИИТВЧ им. П.В.Вологодина, НПО "Светлана", НПО "Севкабель" цикла НИОКР было разработано и изготовлено опытное оборудование для подводного разрушения отдельных и скальных выступов при выполнении аварийно-спасательных работ.

На этапе государственных испытаний в соответствии с программой проведен полный цикл проверки соответствия опытного образца оборудования требованиям заказчика и выполнены технологические работы по разрушению горных пород в условиях Балтийского моря. Получены положительные результаты.

Два комплекса оборудования (ВЧ генератор, фидерная линия, комплект рабочих инструментов и др.) для подводного разрушения переданы на вооружение ВМФ РФ.

СВЧ разрушение влагосодержащих горных пород в массиве [25, 26, 28, 32-34]. Полигонные испытания СВЧ разрушения горных пород проводились для опробования различных схем СВЧ обработки массива с целью выбора наиболее перспективных для технологии проведения выработок по углевещающим породам, а также для уточнения режимов работы СВЧ оборудования.

Объектами воздействия были крупные блоки песчаников, аргиллитов и алевролитов. При проведении испытаний использовался источник СВЧ энергии мощностью 50 кВт, $\lambda_0=5$ см. Фокусирование излучения обеспечивалось эллиптической антенной ($f=1,8$ м). Зона максимальной плотности излучения располагалась на поверхности породы или на небольшой глубине. Плотность потока излучения в зоне фокуса $0,2+0,5$ кВт/см 2 .

Установлено, что наиболее перспективными благодаря существенному снижению энергоемкости разрушения и возможности практической реализации являются: схема СВЧ послыного разрушения забоя и схема с предварительным СВЧ нареза-

зованием нескольких конструкций шпурового инструмента на основе создания в массиве дополнительных свободных поверхностей, что позволило определить рациональные технологические параметры (межэлектродные расстояния, глубина шпуров), параметры электродов и ВЧ воздействия (U , f , R_n , X_n).

Испытания подтвердили правильность принятых технических решений при модернизации ВЧ оборудования (генератор, фидерная линия, согласующее устройство, рабочий инструмент), обеспечивающих улучшение согласования ВЧ генератора с нагрузкой (горной породой) и режим работы фидерной линии (при пониженных напряжениях, с малыми потерями).

Были отработаны технологические схемы разрушения массива с одной свободной поверхностью (система нескольких электродов) и с дополнительной свободной поверхностью (порядное разрушение). Энергоемкость такого разрушения составила $30 \div 45$ кВт·ч/м³, объем разрушаемых кусков - $0,01 \div 0,02$ м³.

Такая технология рекомендуется для создания траншей в скальном грунте и для дноуглубительных работ.

На заключительном этапе испытывались схемы разрушения массива, основанные на использовании эффекта направленного развития трещины (в том числе параллельно свободной поверхности) при обработке массива ВЧ энергией, подводимой расположенными в шпурах электродами (с дисковой контактной частью). Установлено, что для обеспечения отрыва блока по плоскости, параллельной свободной поверхности, отделяемая часть массива должна быть полностью или частично оконтурена щелями; при этом контактная часть электродов должна располагаться на уровне дна щели (но не менее 3 диаметров шпура), а расстояние между шпурами и до щелей - не превышать 10 его диаметров. При $d_{ш}=4$ см высота дисковой части электрода равна $1 \div 1,5$ см, а выделяемая одним электродом энергия $P_{уд}=6 \div 8$ кВт. При расположении на 1 м² 4÷5 электродов откол блока площадью 1 м² происходил за 3÷4 мин, а удельная поверхностная энергоемкость отрыва (с учетом КПД установки) составила $3 \div 5$ кВт·ч/м², причем ее величина практически не зависит от толщины отделяемого блока.

При ограниченной мощности генератора ($P_{вч}=60$ кВт) крупные блоки (площадью несколько квадратных метров) могут быть получены на основе создания "волны разрушения" путем подвода ВЧ энергии к поочередно подключаемым рядам электродов. Таким образом, были получены плиты различных размеров (толщина $10 \div 22$ см, ширина $70 \div 130$ см, длина $70 \div 170$ см). Процесс отбойки не вырождается при снятии последующих слоев. В зависимости от решаемой технологической задачи возможно получение как целых, так и раздробленных плит. При

3. Установлено явление "самозаглубления" ("прорастания") электрода, заключающееся в перемещении зоны максимальной удельной мощности тепловых источников вглубь породы, что позволило выбором рациональных параметров электромагнитного воздействия (напряжения на электроде, частоты поля, размера электрода) предотвратить перегрев породы при интенсивном энерговыделении осуществить бесшпуровое разрушение отдельностей с энергоемкостью ($2 \div 5$ кВт·ч/м³).

4. Изучен механизм "взрывного" разрушения влагосодержащих горных пород в ЭМ поле СВЧ, в основе которого лежат процессы объемного энергопоглощения и нагрева породы, испарения содержащейся в ней влаги, при этом происходит перераспределение концентрации влаги по объему, локализация зон интенсивного поглощения энергии поля на участках повышенной влажности, резкая интенсификация испарения и возникновение разрушающих давлений пара, которые совместно с термическими напряжениями приводят к росту трещин, образованию "шелушек" и их разлету.

5. Обоснован критерий СВЧ разрушения, учитывающий влияние термических напряжений, давления пара и горного давления; получена оценка влияния каждого из этих факторов на энергоемкость СВЧ разрушения. Определены режимы и параметры СВЧ воздействия, обеспечивающие разрушение песчаников в зависимости от их физико-механических свойств.

6. Повышение эффективности разрушения при электромагнитном воздействии на горную породу осуществляется управлением пространственно-временным энерговыделением в породе:

при ВЧ воздействии - выбором параметров и режимов электромагнитного воздействия, формой и размерами электродов и их размещением в породе;

при СВЧ воздействии - распределением плотности потока энергии в "луче", скоростью его перемещения по облучаемой поверхности, положением фокуса в породе и углом падения волны на ее поверхность;

созданием концентраторов электрического поля, термических напряжений и дополнительных свободных поверхностей;

применением механических воздействий для завершения разрушения.

7. Выбор схем разрушения, параметров технических средств и режимов воздействия на породу определяется технологическими условиями (в том числе требованиями к продуктам разрушения, требованиями по безопасности, экологии и др.), свойствами разрушаемой породы и ее состоянием.

8. Разработан безвзрывной способ ВЧ разрушения массива крепких и абразивных пород отрывом на основе направлен-

ного развития трещин путем создания системы взаимодействующих пространственно ориентированных источников энерговыделения.

9. Испытаны различные технологические схемы разрушения массива: с порядной отбойкой породы на дополнительную свободную поверхность; с отбойкой на две дополнительные поверхности; с отбойкой крупных блоков заданных размеров с предварительным оконтуриванием; с использованием комбинированного воздействия: ВЧ - для создания "волны разрушения", образующей трещину в плоскости параллельной свободной поверхности, и механического - для создания трещин, перпендикулярных свободной поверхности, с целью дробления обработанной породы и окончательного отделения ее от массива.

10. Разработан комбинированный (электротермомеханический) способ дробления окисленных железных руд и кварцитов, основанный на последовательном воздействии на породу: ВЧ бесшпуровом контактом (использующим эффект самозаглубления электрода) - для образования трещин и виброударном - для завершения разрушения. Создан и внедрен комплекс оборудования (ВЧ установка и виброгрохот) для поточной технологии выпуска руды в условиях подземных работ.

11. Разработан способ ВЧ разрушения горных пород в водной среде на основе разрыва гальванической связи. Создан и передан на вооружение ВМФ комплекс оборудования (ВЧ генератор, фидерная линия, рабочий инструмент) для разрушения отдельностей и скальных выступов под водой, разработана технология подводного разрушения для снятия кораблей с мели.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. К зависимости электрических свойств мартитогематитовых кварцитов Кривбасса от частоты электрического поля и температуры. - В кн.: Известия ДГИ, том XLII. - М.: Недра, 1964. - С. 91-93.

2. Расчет поля температур в породе и комплексной нагрузки генератора при высокочастотном контактом разрушении горных пород. - В кн.: Физика горных пород и процессов / Тез. докл. Всесоюз. конф. ВУЗов с участием НИИ. - М., 1971. - С. 174-175 (соавтор А.П.Образцов).

3. Расчет нагрузки генератора, электрического и температурного полей в процессе высокочастотного контактного разрушения горных пород с изменяющимися при нагреве диэлектрическими свойствами // Математические методы и вычислительная техника в горном деле: Науч. сообщ. / ИГД им. А.А.Скочинского. - М., 1989. - С. 101-108.

4. Электротермомеханическое разрушение горных пород. - В кн.: Термомеханические методы разрушения горных пород. / Тез. докл. I Всесоюз. конф. - Киев: Наукова думка, 1969. - С. 154-157 (соавторы Е.Ф.Эпштейн, А.А.Галяс).

5. Разрушение горных пород комбинированным (электротермомеханическим) способом // Науч. сообщ. / ИГД им. А.А.Скочинского, вып. 54 - М., 1968. - С. 96-99 (соавторы Е.Ф.Эпштейн, А.П.Образцов).

6. Расчет нагрузки генератора, электрического и температурного полей в процессе высокочастотного контактного разрушения горных пород с изменяющимися при нагреве диэлектрическими свойствами. - В кн.: Применение ТВЧ в электротермии / Тезисы 9-й Всесоюз. конф. - Л., 1981. - С. 114.

7. Особенности формирования и расчет температурных полей в горных породах с зависящими от температуры электрическими свойствами при ВЧ и СВЧ-воздействии. - В кн.: Проблемы горной теплофизики / Тез. докл. 2-й Всесоюз. конф. - Л., 1981. - С. 73-74.

8. К расчету времени разрушения мартитогематитовых кварцитов токами высокой частоты. - В кн.: Известия ДГИ, т. 40. - Днепрпетровск, 1961. - С. 124-130 (соавторы Э.И.Арш, М.Ф.Друкованный).

9. Разрушение горных пород комбинированным электротермомеханическим способом. - В кн.: Тезисы докл. на Всесоюз. межвузов. конф. с участием НИИ. - М., 1967. - С. 143 (соавтор Е.Ф.Эпштейн).

10. Электрические свойства горных пород-диэлектриков, увлажненных морской водой. - В кн.: Комплексные исследования физических свойств горных пород и процессов / Тез. докл. 8-й Всесоюзной науч. конф. - М., 1984. - С. 13 (соавторы Ю.Н.Захаров, Т.А.Карпова).

11. Безвзрывная технология дробления негабаритов на базе высокочастотного контактного способа разрушения. - В кн.: Тезисы докл. Междунар. симпозиума по проблемам прикладной геологии, горной науки и производства. - С.-Пб., 1993. - С. 194-195 (соавторы Ю.Д.Вороновский, В.Ф.Нистратов, А.П.Образцов).

12. Новые возможности высокочастотного контактного способа разрушения горных пород. - В кн.: Тезисы докл. Неделя горняка. - М., МГГУ, 1994. - С. 193 (соавтор Ю.Н.Захаров).

13. Особенности работы фидерной линии при высокочастотном контактным способом разрушения горных пород. - В кн.: Комплексные исследования физических свойств горных пород и процессов / Тезисы докл. 9-й Всесоюзной науч. конф. - М., 1987. - С. 97 (соавторы Ю.Н.Захаров, Л.П.Шаркова).

14. К вопросу повышения эффективности высокочастотного контактного способа разрушения горных пород. - В кн.: Комплексные исследования физических свойств горных пород и процессов / Тезисы докл. 9-й Всесоюз. науч. конф. - М., 1987. - С. 100.

15. Экспериментальные исследования разрушения массива высокочастотным контактным способом // Разрушение углей и горных пород: Науч. сообщ. / ИГД им. А.А.Скочинского, вып. 301. - М., 1995. - С. 129-133 (соавторы А.В.Долголаптев, Ю.Д.Вороновский, А.П.Образцов, В.Ф.Нистратов).

16. О продлении вскрышного сезона многоковшовых экскаваторов. - Уголь Украины. - 1963. - №2. - С. 24-25 (соавторы А.М.Варшавский, Н.В.Филоненко).

17. Über die Verlängerung der Saison im Abraumbetrieb bei Einsatz von Eimerketten- und Schaufelradbaggern - Bergbautechnik (DDR) - 1963. - №9. - p. 15-16.

18. Исследование разрушения железистых кварцитов Кривбасса токами высокой частоты. - Удостоверение о регистрации в Комитете по

делам изобр. и откр. СМ СССР № 21739, 1961 (соавторы Е.Ф.Эпштейн, Э.И.Арш, Г.К.Виторт и др.).

19. Передвижная электрофизическая лаборатория для определения параметров разрушения горных пород в производственных условиях. - Удостоверение о регистрации в Комитете по делам изобр. и откр. СМ СССР №21737, 1961 (соавторы Е.Ф.Эпштейн, Э.И.Арш, Г.К.Виторт и др.).

20. Высокочастотная установка ДГИ-ПЭ-3 для вторичного дробления в условиях подземных работ. - Удостоверение о регистрации в Комитете по делам изобр. и откр. СМ СССР №21740, 1961 (соавторы Е.Ф.Эпштейн, Э.И.Арш, Г.К.Виторт и др.).

21. Технологический процесс автоматической разделки негабаритов в подземных условиях. - Удостоверение о регистрации в Комитете по делам изобр. и откр. СМ СССР №21741, 1961 (соавторы Е.Ф.Эпштейн, Э.И.Арш, Г.К.Виторт и др.).

22. К оценке неадиабатичности процесса нагрева горной породы в электромагнитном поле СВЧ. - В кн.: 1-я Московская городская конф. молодых ученых и спец. угольн. промышл. ИГД им. А.А.Скочинского - М., 1970. - С. 25-27.

23. Образование плазменного факела при воздействии на горную породу энергией СВЧ-поля // Комплексная механизация угольных шахт, вопросы горной электромеханики и привода машин и установок: Науч. сообщ. / ИГД им. А.А.Скочинского, вып. 104. - М., 1973. - С. 67-69 (соавторы Л.М.Блинов, В.М.Ковальчук).

24. Образование и движение плазменных сгустков в поле СВЧ-излучения при радиоволновом разрушении горных пород // Физико-технические проблемы комплексной механизации горнопроходческих работ: Науч. сообщ. / ИГД им. А.А.Скочинского, вып. 126. - М., 1975. - С. 58-63 (соавторы Л.М.Блинов, В.М.Ковальчук, А.П.Образцов).

25. Результаты исследования механизма разрушения влагосодержащих горных пород при СВЧ-воздействии. - В кн.: Вопросы дифракции электромагнитных волн. Междудеятельный сборник, МФТИ. - М., 1982. - С. 89-94.

26. Исследование процесса разрушения влагосодержащих горных пород в СВЧ-поле с целью создания средств для проходки выработок. - В кн.: Комплексные исследования физических свойств горных пород и процессов / Тезисы 7-й Всесоюз. научн. конф. ВУЗов с участием НИИ. - М., 1981. - С. 20 (соавтор А.П.Образцов).

27. К механизму «взрывного» разрушения песчаников в СВЧ-поле. - В кн.: Комплексные исследования физических свойств горных пород / Тезисы докл. Всесоюз. научн. конф. ВУЗов с участием НИИ, ч. 2. - М., 1977. - С. 75 (соавтор А.П.Образцов).

28. Пути снижения энергоемкости процесса радиоволнового разрушения горных пород при проходке выработок / Совершенствование средств механизации проведения подготовительных выработок: Научн. сообщ. / ИГД им. А.А.Скочинского, вып. 212. - М., 1982. - С. 63-65 (соавторы А.П.Образцов, Ю.Н.Захаров, А.П.Уваров).

29. К оценке влияния скорости нагрева песчаника на энергоемкость «взрывного» разрушения. - В кн.: Термомеханические методы разрушения горных пород. / Тез. докл. 3-й Всесоюзной конф. - Киев: Наукова думка, 1976. - С. 68-70 (соавтор А.П.Образцов).

30. Развитие температурного поля в горной породе при воздействии электромагнитной волны СВЧ. - В кн.: Физика горных пород и процессов / Тезисы докл. Всесоюз. научн. конф. ВУЗов с участием НИИ. - М., 1974. - С. 159-160.

31. Особенности разрушения горных пород в СВЧ-поле в зависимости от их физических свойств и условия реализации некоторых механизмов разрушения. - В кн.: Физика горных пород и процессов / Тезисы докл. Всесоюз. научн. конф. ВУЗов с участием НИИ. - М., 1974. - С. 158 (соавторы Л.М.Блинов, А.П.Образцов).

32. К определению эффективного режима воздействия плоской электромагнитной волны СВЧ на горную породу. - В кн.: Термомеханические методы разрушения горных пород: ч. 2 / Тез. докл. 2-й Всесоюз. конф. - Киев: Наукова думка, 1972. - С. 68-72 (соавтор А.П.Образцов).

33. Экспериментальное исследование «взрывного» разрушения горных пород в электромагнитном поле СВЧ. - В кн.: Термомеханические методы разрушения горных пород: ч. 5. - Киев: Наукова думка, 1972. - С. 49-52 (соавторы Л.М.Блинов, А.П.Образцов).

34. Исследование возможности снижения энергоемкости разрушения горных пород при воздействии мощных потоков СВЧ энергии миллиметрового диапазона. - В кн.: Применение СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях / Тез. докл. Всесоюз. 4-й научно-практической конф. - Саратов, 1991. - С. 49-51 (соавтор А.П.Уваров).

35. Использование СВЧ-нагрева для моделирования газодинамических явлений / Тезисы докл. Всесоюз. конф. по механике горных пород. - М., 1981. - С. 32 (соавтор А.П.Образцов).

36. Критерии разрушения песчаников при воздействии СВЧ-излучения на массив / Тезисы докл. 8-й Всесоюз. конф. - М., 1984. - С. 37 (соавтор А.П.Образцов).

37. Способы высокочастотного контактного и СВЧ-механического разрушения крепких, скальных и мерзлых горных пород - В кн.: Проблемы смерзания и липкости минерального сырья в процессах его добычи, транспортировки и переработки / Материалы постоянно действующего Российского заочного семинара, вып. 1. - Якутск: Якутский научный центр СО РАН, 1994. - С. 41-45 (соавторы А.В.Долголаптев, Ю.Д.Вороновский, Н.И.Рябец, В.П.Миронов, В.А.Хоминский).

38. Новая технология разрушения массива крепких пород с использованием энергии электромагнитного поля // Технология подземных горных работ: Научн.сообщ. / ННЦ ГП ИГД им. А.А.Скочинского, вып. 308. - М., 1998. - С. 115-121 (соавторы А.В.Долголаптев, Ю.Д.Вороновский, В.Ф.Нистратов, А.П.Образцов, А.П.Уваров).

39. К вопросу определения динамического поля напряжений цилиндрических оболочек. - Прикладная механика. - Т. 2, вып. 9. - Киев. - 1966. - С. 53-58 (соавтор Р.П.Дидык).

40. Методы экспериментальной оценки осесимметричных движений стенки трубы при деформации взрывом. - Инженерно-физический журнал. - 1969. - Т. 16, №2. - С. 251-256 (соавторы Р.П.Дидык, А.Г.Тесленко).

41. Управление процессом разрушения горных пород в интенсивных электромагнитных полях. - Доклады конференции «Неделя горяча». - М.: МГГУ, 1998.

42. Разрушение крепких пород в массиве на основе комбинированных электрофизических способов. - Доклады конференции «Неделя горняка». - М.: МГГУ, 1998 (соавторы А.В.Долголаптев, Ю.Д.Вороновский, А.Г.Максименко, А.Ф.Нистратов, А.П.Образцов).

43. А.с. №139920 (СССР). Устройство для автоматического дробления крупных кусков горных пород (соавторы Е.Ф.Эпштейн, Э.И.Арш, Г.К.Виторт). - Оpubл. в Б.И. №14, 1961. - ДСП.

44. А.с. №146810 (СССР). Устройство для регулирования величины сеточного тока генератора (соавторы Е.Ф.Эпштейн, Э.И.Арш, Г.К.Виторт). - Оpubл. в Б.И. №9, 1962.

45. А.с. №1104276 (СССР). Способ управления труднообрушающейся кровлей (соавторы Г.А.Катков, А.А.Журило, Ю.Н.Захаров). - Оpubл. в Б.И. №27, 1984.

46. А.с. №1107388 (СССР). Способ проходки скважин в рыхлых породах с включениями валунов и галечника (соавторы Ю.А.Арсентьев, Ю.Н.Захаров и др.). - Оpubл. в Б.И. №37, 1984.

47. А.с. №1250818 (СССР). Рабочий орган для разрушения горных пород токами высокой частоты (соавторы А.П.Образцов, Ю.Н.Захаров, А.В.Долголаптев, Л.П.Шаркова, А.Д.Бокарев, Ю.Е.Наумшин, В.В.Моргун, Н.Я.Юхно и др.). Заявл. 29.12.84. - Оpubл. 09.05.85. - ДСП.

48. А.с. №1524587 (СССР). Устройство для разрушения горных пород токами высокой частоты (соавторы Ю.Н.Захаров, А.Д.Бокарев, Л.П.Шаркова, О.А.Крымцев, В.В.Моргун, Ю.Е.Наумшин, Н.Я.Юхно и др.). Заявл. 13.08.87. - Оpubл. 22.07.89 - ДСП.

49. Патент РФ №2065047. Способ направленного разрушения природного камня (соавторы А.В.Долголаптев, Ю.Д.Вороновский, Ю.Н.Захаров, В.Ф.Нистратов, А.П.Образцов). - Оpubл. в Б.И. №22, 1996.