

В статье дан обзор применения мощных источников электромагнитного поля СВЧ в горной промышленности для разупрочнения горных пород, приведены диэлектрические характеристики минералов, рассмотрен механизм термомеханического разрушения породы СВЧ-полем и требования к режиму разупрочнения перед помолотом, а также описаны результаты пробных экспериментов.

(Продолжение. Начало в № 2 (20), 2002 г., с. 35-41)

## НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ:

# РАЗУПРОЧНЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД МОЩНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СВЧ

*Петров В.М.,*  
кандидат физико-математических наук, доцент

### МЕХАНИЗМ РАЗУПРОЧНЕНИЯ

Снижение прочности или разрушение горных пород мощным электромагнитным полем сверхвысоких частот связано, прежде всего, с их нагревом. Вследствие диэлектрических потерь энергия СВЧ-поля поглощается породой и превращается в тепловую энергию. При этом температура материала повышается на

$$\Delta T = \rho \tau / cd, \quad (1)$$

где  $\rho$  - мощность СВЧ, поглощаемая единицей объема породы, рассчитываемая по соотношениям (1) или (2) первой части,  $\tau$  - время воздействия поля,  $c$  - теплоемкость,  $d$  - плотность породы.

Если взять поле частотой 2,45 ГГц, напряженностью 1 МВ/м (что близко к предельной для воздуха) и прикладывать его в течение времени  $\tau = 100$  мкс, то нагрев минералов разных классов будет следующим:

- кварц, галит и др. неполярные (табл. 1 первой части) -  $\Delta T = 0,005$  К;
- полевые шпаты, асбест и др. полярные (табл. 2) -  $\Delta T = 0,5$  К;
- гетит, лимонит, шеелит (полупроводящие по табл. 4) -  $\Delta T$  более 5 К;
- пирит, гематит, магнетит (проводящие, табл. 3) -  $\Delta T$  более 500 К.

Следовательно, проводящие и полупроводящие минералы значительно нагреваются в электрическом поле СВЧ, тогда как диэлектрические практически негреваются. Для нагрева последних можно использовать более высо-

кие частоты, но этому препятствует уменьшение глубины проникновения СВЧ-поля. Поэтому максимальной разрешенной частотой, используемой в СВЧ-энергетике, является 2,45 ГГц.

Значительное повышение времени выдержки  $\tau$  породы в поле СВЧ, которое обычно используется в лабораторных экспериментах, как будет показано ниже, нецелесообразно с энергетической точки зрения. Поэтому приведенные оценки  $\Delta T$  близки к предельным.

При нагревании в породе развиваются термомеханические напряжения, идет процесс испарения влаги, декрипитация, релаксация остаточных напряжений, происходят полиморфные и фазовые превращения, выгорание органических соединений [1]. В результате прочность пород с ростом температуры уменьшается в несколько раз (рис. 1). Однако, когда речь идет о разупрочнении СВЧ-нагревом, имеется в виду не медленное и однородное повышение температуры, а резкое и неоднородное, при котором разрушающие термомеханические напряжения во много раз больше, а необходимые энергозатраты - меньше.

Для повышения температуры породы массой  $m$  на  $\Delta T$  нужна энергия:

$$W = mc \Delta T \quad (2)$$

Так как типичное значение удельной теплоемкости минералов лежит в интервале 700-800 Дж/(кг·К), то для нагрева тонны породы на 100 К необходима энергия 75 МДж или 20 кВт·ч. Несмотря на то что СВЧ-технологии относятся к числу энергосберегающих и отличаются большим коэффициентом ввода энергии в обрабатываемый материал (около 0,7 с учетом КПД генератора 85%) [2], исходные энергозатраты составят около 30 кВт/ч на тонну породы, что сопоставимо с энергозатратами на ее

измельчение чисто механическими средствами. Поэтому СВЧ-технология разупрочнения энергетически выгодна прежде всего для пород, содержащих небольшое количество (до 10%) рудных минералов, когда нагревается один этот минерал без нагрева пустой породы и затрачивается не более 3 кВт·ч/т энергии, а на последующих операциях измельчения и обогащения экономится 10-30 кВт·ч/т. Рассмотрим этот процесс более подробно.

Обрабатываемая горная порода содержит минералы металлов (пирит, никелит, манганит и т.д.) и пустую породу (кварцит, кальцит, гранит и т.д.). Первые минералы обладают очень большими потерями в диапазоне СВЧ, а вторые - относительно малыми. Поэтому в СВЧ-поле рудные минералы нагреваются, а пустая порода вначале остается холодной. Температура выравнивается лишь спустя некоторое время. Для определения распределения температуры вблизи границы раздела фаз нужно решить динамическое уравнение теплопроводности для двухфазных сред. Его решение показывает, что распределение температуры описывается интегралом ошибок с диффузионной длиной:

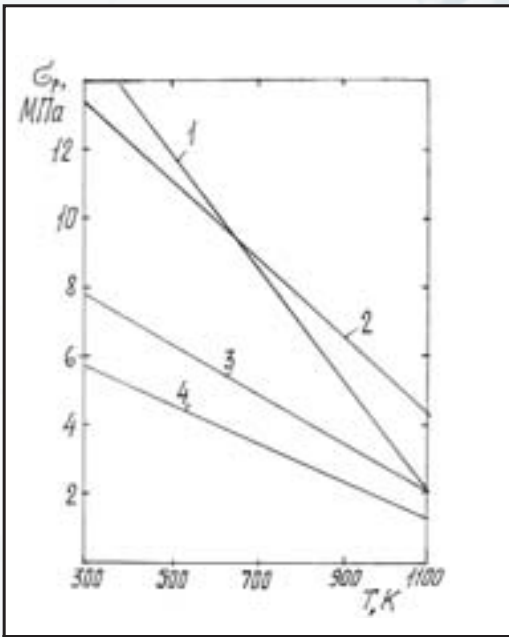
$$L = 2\sqrt{\lambda t/cd}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности. Если фаза 1 поглощает СВЧ-энергию, а фаза 2 нет, то диффузионная длина  $L$  характеризует расстояние, на которое тепло из фазы 1 распространяется в фазу 2 за время  $t$ . Качественная картина распределения температуры в двухфазной среде с плоскими границами раздела фаз показана на рис. 2. При мгновенном нагреве фазы 1 импульсом длительностью  $\tau = 0$  повышенная температура создается только в этой фазе, а в фазе 2 она равна окружающей температуре  $T_0$ . В статическом случае (время нагрева  $\tau = \infty$ ) температура выравнивается

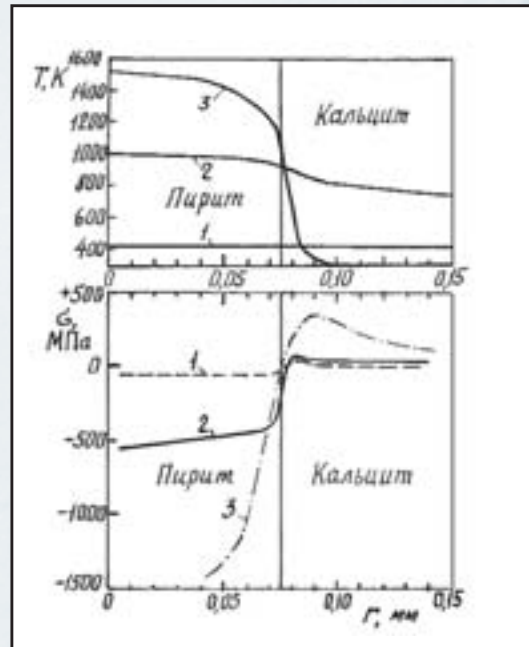
по обеим фазам. При импульсном нагреве распределение температуры у границы резко неоднородно, причем, чем меньше длительность импульса, тем больше градиент температуры.

Подставляя в (3) типичные численные значения параметров минералов, получим  $L = \sqrt{10^{-5}t}$ . Следовательно, за время 100 мс тепло успевает распространиться на 1 мм от границы фаз, за 1 мс - на 0,1 мм и за 10 мкс - на 10 мкм. Для уменьшения потерь тепла в пустой породе необходимо время нагрева рудного минерала делать по возможности малым - не более 1 мс. Это возможно только при использовании генераторов СВЧ очень большой мощности.

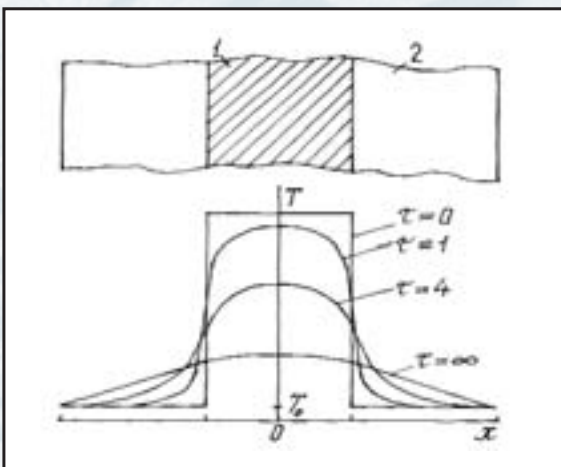
Перепад температуры у границы раздела фаз при импульсном СВЧ-нагреве приводит к появлению значительных термомеханических напряжений, обусловленных разными тепловыми расширениями объемов. В работе [3] дан численный расчет механических напряжений в кальците с включениями шариков пирита диаметром 0,15 мм, нагреваемого импульсами СВЧ-поля разной длительности  $\tau$ . Расчет сделан методом конечных элементов, и его результаты представлены на рис. 3. Механические напряжения в пирите - сжимающие и имеют поэтому отрицательный знак, а в кальците - растягивающие, положительные. При времени нагрева 1 с (кривые 1) температура успевает выровняться по объему, и возникающие термомеханические напряжения невелики (в кальците максимум 20 МПа). При облучении в течение 40 мс тепло также в значительной мере успевает распространиться по обеим фазам, и механические напряжения лишь немного больше - максимум 30 МПа (кривые 2). В случае резкого СВЧ-нагрева (40 мкс, кривые 3) градиент температуры между фазами достигает 1200 К, а механические напряжения - 360 МПа. При этом энергозатраты в по-



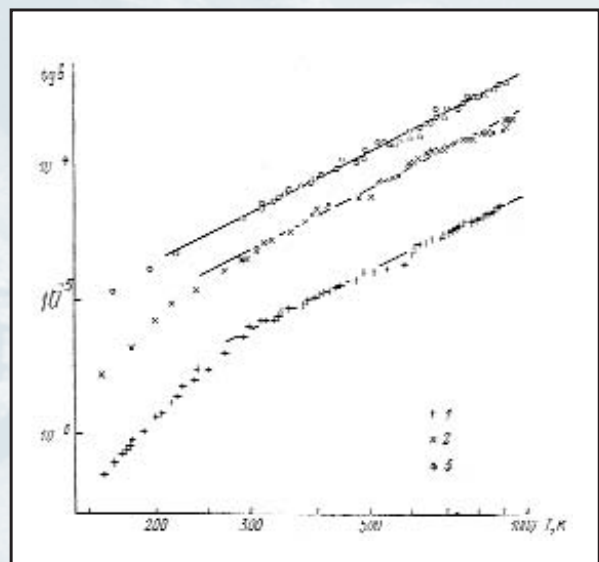
**Рис. 1.** Зависимость предела прочности на растяжение от температуры для образцов железистого кварцита (1), гнейса (2), гарцбургита (3) и долерита (4) по данным [1].



**Рис. 3.** Радиальное распределение температуры  $T$  и термомеханического напряжения  $\sigma$  в образце кальция с шаровым включением пирита при СВЧ-облучении: 1 - удельная мощность  $10^{10}$  Вт/м<sup>3</sup>, длительность  $\tau = 1$  с, 2 - мощность  $10^{12}$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\tau = 40$  мс, 3 -  $10^{14}$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\tau = 40$  мкс.



**Рис. 2.** Распределение температуры в пластине, состоящей из внутренней поглощающей фазы 1 и наружной непоглощающей фазы 2, при мгновенном ( $\tau = 0$ ), импульсном ( $\tau = 1$  и 4) и статическом ( $\tau = \infty$ ) СВЧ-нагреве.



**Рис. 4.** Температурная зависимость диэлектрических потерь лейкосапфира на частотах 9 ГГц (1), 36 ГГц (2) и 72 ГГц (3).

следнем случае ( $4 \cdot 10^9$  Дж/м<sup>3</sup>) на порядок меньше, чем во втором ( $4 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>), что лишний раз подтверждает преимущества резкого нагрева большой СВЧ-мощностью.

Отметим, что полученные в расчетах термомеханические напряжения в кальците (20, 30 и 360 МПа) заведомо больше предела прочности пустых горных пород, которая составляет 5-15 МПа на растяжение (рис. 1) и 9,4 МПа для гранита, 3,5-5,5 МПа для известняка, 2,1-6,9 МПа для песчаника на сжатие. Поэтому во всех случаях в результате СВЧ-облучения произойдет растрескивание кальцита вокруг пиритового включения, что должно облегчить и удешевить последующие помол и сепарацию.

Использование очень коротких импульсов СВЧ-поля длительностью 10 нс - 1 мкс с мощностями в 10 МВт - 10 ГВт затрудняется пробоем воздушных промежутков между электродами и кусочками породы, в результате чего энергия поля тратится не на нагрев породы, а на нагрев плазмы СВЧ-разряда. Это вызывает образование ударных волн, которые возможно приведут к разрушению кусочков породы. Такие эксперименты по разрушению поверхностных покрытий металлов описаны в [2]. Однако более эффективно разрушение твердых тел искровым СВЧ-разрядом не в газе, а в жидкости. В [2] приведены результаты расчета параметров ударной волны от точечного взрыва в жидкости, созданного импульсом СВЧ мощностью 100 МВт и длительностью 100 нс (энергия импульса 10 Дж) при эффективности 10%. В радиусе 1 мм давление достигает 1 ГПа, что значительно больше предела прочности минералов. Это указывает на возможность использования СВЧ-разрядов для разрушения горных пород. В ряде случаев разрядный механизм разрушения может оказаться более выгодным энергетически, чем тепловой [4, 5].

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВЧ-ОБРАБОТКИ

Технология СВЧ-обработки различных материалов уже отрабатана и применяется в промышленности (вулканизация резины, спекание керамики, сушка древесины, синтез новых материалов и т.д.), в сельском хозяйстве (обеззараживание зерна) и просто в быту (СВЧ-печи для приготовления пищи). Решены вопросы защиты персонала от СВЧ-облучения и экологической безопасности [2, 6]. В горном деле есть свои особенности, связанные с многотоннажным производством, тяжелыми условиями работы оборудования, требованиями минимальных энергозатрат и большого срока службы оборудования. В бытовых СВЧ-печах, при лабораторных экспериментах и многих промышленных технологиях используется режим периодической загрузки определенной порции продукции в рабочую камеру, после чего на определенное время включается СВЧ-генератор. В горной промышленности такой циклический режим работы неприемлем. Это связано не столько с требованиями высокой производительности, сколько с необходимостью постоянного согласования СВЧ-генератора с нагрузкой. Рассогласование (отражение электромагнитных волн от загруженной породой рабочей камеры) приводит к значительным потерям энергии и нарушению работы и даже выходу из строя мощных генераторов СВЧ. Диэлектрические параметры горных пород сильно меняются при нагревании. Даже у наиболее стабильных кристаллов типа

лейкосапфира диэлектрическая проницаемость и потери изменяются с ростом температуры (рис. 4). В некоторых минералах при нагреве наблюдаются фазовые переходы или химические превращения, что также изменяет их диэлектрические характеристики. В увлажненных породах при СВЧ-облучении происходит испарение влаги. Вода же обладает высокой диэлектрической проницаемостью (около 80), большими релаксационными диэлектрическими потерями в диапазоне СВЧ (табл. 1), а так как в порах породы она находится в виде электролита - и низким удельным электрическим сопротивлением. Поэтому сушка и выпаривание влаги ведут к значительному уменьшению как диэлектрической проницаемости, так и потерь (табл. 2).

Любые изменения диэлектрических параметров породы в процессе облучения изменяют входное комплексное сопротивление камеры, являющейся нагрузкой генератора, и как следствие - к недопустимому рассогласованию СВЧ-тракта. Для обеспечения постоянства нагрузки СВЧ-генератора и его непрерывного согласования необходимо использовать непрерывный режим загрузки породы в камеру с постоянной скоростью, при котором одновременно облучаются как холодные, так и нагретые порции породы. Наиболее просто и удобно такой режим можно осуществить, непрерывно просыпая породу через рабочую камеру с постоянной скоростью. В этом случае входное комплексное сопротивление камеры будет определяться усредненными па-

Таблица 1. Диэлектрические параметры воды при 20 °С по [2]

Тип воды	Частота, ГГц	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\text{tg } \delta$
Дистиллированная	1	79,8	6,0	0,075
	3	77,2	13,1	0,170
Питьевая	1	80	2,5	0,031
	3	80	17	0,213
Подсолшная (1 % NaCl)	3	70	31,1	0,45

раметрами холодной породы на ее входе и горячей на выходе и не будет изменяться в процессе обработки, а генератор может быть постоянно настроен на режим максимальной отдачи мощности породе.

С точки зрения экономичности желательно, чтобы генератор работал в непрерывном режиме, но создавал импульсное воздействие на породу. Этого можно добиться, просыпая дробленую породу через активную зону рабочей камеры. Если кусочки породы падают с высоты  $h$  и проходят в камере путь  $a$  под воздействием СВЧ-поля, то время воздействия определяется соотношением:

$$\tau = a/\sqrt{2gh}, \quad (4)$$

где  $g$  - ускорение земного притяжения,  $a \ll h$ . Так, при  $a = 15$  мм и  $h = 3$  м время обработки составит 2 мс.

Технологическая установка для СВЧ-обработки включает соединенные линией передачи мощный генератор с источником питания и рабочую камеру с системой непрерывной подачи и отгрузки породы (рис. 5). Желательный размер кусочков породы - в пределах 1 - 20 мм, и они должны подаваться с постоянной

скоростью. Рабочие камеры могут быть открытыми, резонаторными, волноводными, коаксиальными, полосковыми, а в метровом диапазоне - индукционными.

В открытой рабочей камере падающий в свободном пространстве поток породы облучается антенной, например рупорной (рис. 5а). Это наиболее простая конструкция установки, но требует наиболее сложной защиты от СВЧ-излучения.

Резонаторные камеры (рис. 5б) в случае малых потерь в породе обеспечивают повышенную напряженность СВЧ-поля при заданной мощности. В них используются как одномодовые резонаторы (цилиндрические с  $E_{010}$  или  $H_{011}$  типами колебаний), так и многомодовые (например прямоугольные в СВЧ-печах). Многомодовые резонаторы при введении обрабатываемого материала не расстраиваются, а начинают работать на новых типах колебаний с собственными частотами, близкими к частоте генератора.

В волноводных камерах (рис. 5в) используются прямоугольные волноводы с  $H_{01}$ -типом стоячей волны. Камеры легко настраиваются для обработки пород с очень большими потерями на ра-

бочей частоте. Для настройки дополнительно используется короткозамыкающий поршень.

В коаксиальных камерах активной зоной служит зазор центрального проводника линии (рис. 5г). Для компенсации емкостного сопротивления нагрузки используется короткозамкнутый отрезок коаксиальной линии за зазором, длина которого регулируется поршнем.

Полосковые камеры (рис. 5д) отличаются простотой загрузки породы. Для диэлектрических пород используется полосковая линия с разомкнутым концом, а для проводящих - с короткозамкнутым. Меняя расстояние от центра потока породы до конца линии, можно достичь оптимального согласования СВЧ-тракта.

Индукционные камеры (рис. 5е) широко применяются для ВЧ-нагрева и закалки металлов. Они могут использоваться и для обработки проводящих горных пород.

В установки для СВЧ-разупрочнения входят также не указанные на рис. 5 необходимые согласующие и подстроечные элементы СВЧ-тракта, элементы защиты СВЧ-деталей от разрушающего и загрязняющего воздействия горной породы, а также защиты персонала от СВЧ-излучения. Экранирование СВЧ-поля в местах загрузки и выгрузки породы осуществляется ее прохождением через заперделенные волноводы или специальные окна с металлической спиралью [8], введением в загрузочные патрубки пазов глубиной в четверть длины волны [9] и т.д. В волноводной рабочей камере (рис. 5в) ставят дополнительные элементы, улучшающие согласование СВЧ-генератора с нагрузкой и концентрирующие СВЧ-поле на обрабатываемом материале [10]. Облучение породы иногда сочетают с ее механической обработкой в дробилках, мельницах, а также бурами или резцами.

**Таблица 2.** Изменение диэлектрических параметров пористых пород при увлажнении.

Порода	Пористость, %	Диэлектрич. проницаемость		Удельное сопротивление, Ом.м	
		сухая	влажная	сухая	влажная
Песок	16	4	20	$10^7$	$10^7$
Песчаник	14	5	10	$10^6$	$10^7$
Глинистый сланец	20	5	20	$10^4$	$10^7$
Гранит	2,8	6	7	$10^6$	$10^7$
Мрамор	-	7	8	$3 \cdot 10^6$	$10^7$
Базальт	4	18	-	$3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
Гипс	3,2	8	-	-	$10^4$
Порфир	3,2	-	-	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$
Порфирит	2,7	-	-	$10^6$	$3 \cdot 10^7$
Габбро	1,6	9	-	$4 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$
Доломит	-	8	-	$10^7$	10
Диабаз	1,4	8,5	-	$10^7$	$6 \cdot 10^7$
Известняк	-	8	12	$10^7$	10
Перидотит	1,4	12	-	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$
Терф	-	2	60	-	$10^7$

**ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ**

Эффективность СВЧ-технологий в горном деле определяется прежде всего наличием подходящих СВЧ-генераторов большой мощности с высоким коэффициентом преобразования энергии сети 50 Гц в энергию СВЧ-поля (80-90%). Проблема создания таких источников поля облегчается тем, что в отличие от генераторов для связи или радиолокации, к ним не предъявляются жесткие требования по стабильности частоты, моночастотности или собственным шумам. Источник СВЧ-поля должен быть лишь простым, надежным и экономичным.

Из разработанных в основном для радиотехнических применений и ускорительной техники генераторов для СВЧ-энергетики наиболее подходящими являются магнетроны, обладающие высоким КПД и способностью работать на нагрузки с меняющимся и относительно большим коэффициентом стоячей волны (КСВ). В настоящее время выпускаются магнетроны непрерывно-

**Таблица 3. Магнетронные генераторы ГНПП "Исток".**

Тип	Частота, МГц	Мощность, кВт	КПД, %	Допустимый КСВ	Выход энергии
M137	460 ± 1 %	50	70	3,0	коакс. 20/66
M93	915 ± 1,4 %	25	75	3,0	коакс. 20/66
M116	915 ± 1,4 %	50	75	3,0	волнов. 104x220
M144	2450 ± 2 %	5	60	3,0	волнов. 45x90
M149	2425 2475 ± 2%	5	55	3,0	волнов. 45x90

го режима мощностью 50-100 кВт. Параметры непрерывных магнетронов фрязинского ГНПП "Исток" представлены в табл. 3. ГУНПП "Магратеп" при НИИ "Исток" предлагает свои магнетроны для СВЧ-энергетики на 50 кВт (460 МГц) и 100 кВт (915 МГц) с КПД = 85%.

Значительно большей непрерывной мощностью обладают магнетронные усилители - амплитроны или ВУМы (волноводный усилитель магнетронный). В дециметровом диапазоне волн они обеспечивают мощности 0,5-1,0 МВт в непрерывном режиме и 10 МВт в импульсном, при КПД 55-85%. Предельная же мощность импульсных магнетронов согласно расчетам [2] может достигать 39 МВт при длительности им-

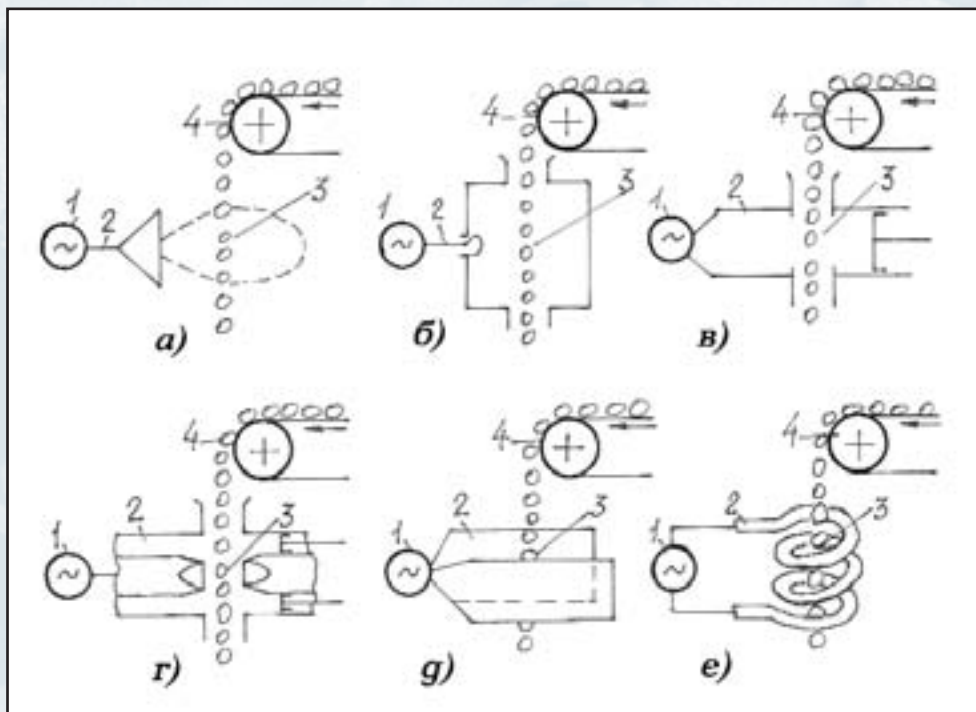
пульса 2 мкс и 390 МВт - при длительности 200 нс.

Для телевизионных передатчиков выпускаются мощные многорезонаторные клистроны, которые после усовершенствования, возможно, окажутся применимыми и в горном деле.

ГНПП "Исток" предлагает многолучевые клистроны с жидкостным охлаждением мощностью 60 кВт и с воздушным охлаждением на 30 кВт (частоты 470-810 МГц, выход коаксиальный 31/8 дюйма, средняя наработка на отказ - 15 000 час.). Клистроны могут иметь мощность до 100 кВт при КПД равном 45-50%.

Для генерации очень мощных импульсов созданы релятивистские приборы СВЧ - гиротроны и релятивистские магнетроны. Гиротроны дают мощности около 1 МВт (возможно до 1 ГВт) при длительности до 1 с и КПД до 40%. Релятивистские магнетроны генерируют импульсы мощностью до 10 ГВт в 10-сантиметровом диапазоне при КПД = 43%.

В последнее время специально для энергетики разрабатываются сверхмощные генераторы СВЧ с виртуальным катодом - варкаторы [2]. Это пучково-плазменный генератор с колебаниями виртуального катода в резонаторе. Существенным преимуществом варкатора является его простота, связанная с отсутствием замедляющей системы и фокусирующего магнитного поля. Недостаток прибора - немонохроматичность излучения - несуществе-



**Рис. 5.** Схема установок для обработки горных пород СВЧ-полем: 1 - генератор СВЧ, 2 - линия передачи, 3 - рабочая камера, 4 - система загрузки.

нен для энергетики. Созданные к настоящему времени варкаторы имеют мощности до 2 ГВт на частоте 3 ГГц, при длительности импульса 30 нс и КПД равном 7,5%. Вне сомнения, эти параметры будут скоро улучшены.

**Обзор экспериментальных результатов разупрочнения горных пород СВЧ-полем будет дан в следующем номере журнала.**

ЛИТЕРАТУРА:

1. Емелин М.А. и др. Новые методы разрушения горных пород. М., Недра, 1990.
2. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. М., Наука, 2000.
3. Salsman J.B. et al. Short-pulse microwave treatment of disseminated sulfide ores. Minerals Eng., 1996, v. 9, No 1, 43-54.
4. Диденко А.Н. О возможности использования мощных СВЧ-колебаний для технологических целей. Доклады РАН, 1993, т. 331, № 5, 571-572.
5. Курец В.И., Рудашевский Н.С. Электроимпульсная дезинтеграция - оптимальная технология высвобождения зерен акцессорных минералов. Доклады АН СССР, 1991, т. 322, № 6, 1086-1089.
6. Clark D.E. Microwave processing of materials. Annu. Rev. Mater. Sci, 1996, v. 26, 299-331.
7. Ильченко В.С. Собственные СВЧ-диэлектрические потери в  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 300-1000 К. Физ. твердого тела, 1989, т. 31, № 7, 135-138.
8. Шмырев В.В, Молохов М.Н. Окно для загрузки и разгрузки СВЧ-камеры нагрева. Авт. св. СССР № 1123118, кл. H05B 6/64, 1976.
9. Москалев А.Н. и др. Устройство для СВЧ-обработки сыпучих материалов. Авт. св. СССР № 1592958, кл. H05B 6/64, 1988.
10. Проценко В.Ф., Гончаренко В.М. Устройство для СВЧ-термообработки диэлектрических материалов с высоким темпом нагрева. Авт. св. СССР № 1582364, кл. H05B 6/78, 1988.

**АККУМУЛЯТОРЫ**

**Более 200 видов!  
Все типоразмеры!**



Ремонт и изготовление любых аккумуляторных сборок

**www.time1.ru**

Москва (095) 962-94-10  
С.-Петербург (812) 535-38-75, 535-25-96  
E-mail: ms\_time@hotmail.com

Изготовление заказных аккумуляторных сборок

**www.continent-tm.ru**

ОКБ "Титан"  
125124, Москва, 1-я ул.Ямского Поля, 17  
тел.: (095) 257-0168, 257-6306  
e-mail: info@continent-tm.ru

Ремонт аккумуляторных батарей



**Предприятие ЭРА, г. Москва, тел.: (095) 330-62-22, 332-92-18**

**Агрегаты бесперебойного питания, инверторы, конверторы, зарядные устройства, гелио-ветро-дизель-генераторы, источники питания, корректоры мощности, помехоподавляющие фильтры, преобразователи частоты, приборы контроля качества электроэнергии, стабилизаторы, аккумуляторы. Системы: проектирование, монтаж, обслуживание, ремонт.**