

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ “ВЗРЫВНОГО” РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД – ДИЭЛЕКТРИКОВ НАПРАВЛЕННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОТОКОМ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ ЭНЕРГИИ СВЧ

Л. М. Блинов^{*1}, А. П. Герасименко², Ю. В. Гуляев¹, А. В. Долголаптев³, В. А. Черепенин¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

² АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»,
127083, Москва, ул. 8 Марта, 10-1

³ Национальный Научный Центр Горного Производства – ИГД им. А.А. Скочинского,
140004, г. Люберцы Московской обл., Октябрьский пр., 411

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2019 г.

Аннотация. Представлены результаты исследований электрических свойств горных пород-диэлектриков (песчаники, граниты и им подобные) в диапазоне СВЧ ($\lambda = 1,0 - 20$ см) и процессов их разрушаемости направленным электромагнитным потоком сконцентрированной энергии СВЧ на длине волны 5 см с мощностью СВЧ излучения до 50 кВт. Предложены различные способы и устройства для концентрации и ввода энергии СВЧ в горную породу.

Рассмотрены механизмы разрушения крепких горных пород-диэлектриков в зависимости от их электрофизических свойств и параметров электромагнитного потока и их роль в выборе технологической схемы реализации способа проходки горного массива на радиофизическом принципе.

Ключевые слова: разрушение массива твёрдых горных пород-диэлектриков; разупрочнение и разрушение твёрдых горных пород; мощное СВЧ излучение; сфокусированный поток СВЧ мощности; “взрывной” эффект разрушения.

Abstract. Many different electrical and dielectrical characteristics of hard rock materials (as granites, sandstones, e t. c.) are presented here. The microwave region of electromagnetic wavelengths ($1,0 \div 20$ cm) was in the spotlight, because the main goal of authors was the maximum effective influence on these materials by this electromagnetic field to achieve a maximal destroying in available power level 50

* lmblinov@mail.ru

kW. Different methods and arrangements are proposed here to concentrate and inject microwave power in massive hard rocks. To avoid an unwanted microwave breakdown in high electromagnetic power level, mechanical power addition from two or more sources of lower electromagnetic power, is proposed and confirmed experimentally. Also, a microwave power transport through a plasma channel by surface wave is proposed and accompanied by necessary calculations. Experimental equipment, having a microwave power 50 kW, is described. It has a metallic ellipsoidal reflector, which reflects microwave power from quasi-point source, located in neighbor focus of ellipsoid, into another focus. In this focus, probing the massive hard rocks, very high power concentration is achieved; it causes a destruction and disaggregation of the material. The main new approval of this work is the existing of some “explosive” mechanism of destroying, which is very intensive and occurs when some phase transformation happens in the material under the influence of intensive microwave field, and in the same time some active temporal change of the field occurs. The result can exceed the expected many times. All conclusions, however, are now qualitative in nature and demand the careful experimental check and study. In the final part of the work authors propose their opinion about prospects of method and compare it with other known methods. Their conclusions are very optimistic and encouraging.

Key words: destruction of hard rocks – dielectrics; destroying and disaggregation of hard rock mass; high power microwave field; focused microwave power; “explosive” effect of a destroying.

1. Введение

Создание эффективной, управляемой и экологически чистой технологии разрушения массива крепких горных пород является одной из главных задач в процессах добычи полезных ископаемых без использования взрывных работ, а также при проходке туннелей в подземном строительстве. С этой целью разрабатываются электрофизические способы разрушения, основанные, в частности, на использовании электромагнитной энергии СВЧ. “Взрывной” эффект разрушения в этом случае достигается при интенсивном локальном воздействии на горную породу, на небольшой глубине от поверхности,

направленным электромагнитным потоком сконцентрированной энергии СВЧ, в результате которого осуществляется эффективный диэлектрический нагрев породы с образованием термических напряжений (градиента температуры), либо давления пара (градиента давления) во влагосодержащих породах, либо одновременного образования и того и другого. В этом случае эффективность разрушения прежде всего определяется электрофизическими свойствами горных пород-диэлектриков и параметрами электромагнитного потока сконцентрированной энергии СВЧ (длиной волны, величиной плотности мощности, размерами и местоположением в породе зоны концентрированного воздействия). Понимание процессов, протекающих в горной породе с известными электрическими свойствами при её разрушении энергией СВЧ различной плотности мощности СВЧ является научной основой выбора рациональных параметров и режимов СВЧ электромагнитного воздействия на горные породы. Исследования разрушаемости крепких горных пород и бетонов были начаты в 1964 году на одном из предприятий электронной промышленности (темы “Эксперимент”, “Гранит”, “Гранит Г”), а с 1970 года были продолжены совместно с Институтом Горного Дела им. А.А. Скочинского в лаборатории электрофизического разрушения горных пород (зав. лаб. А.П. Образцов, А. В. Долголаптев). В данной работе кратко представлены результаты и анализ совместных исследований разрушаемости крепких горных пород, главным образом песчаников Донбасса, гранитов и им подобных, направленным электромагнитным потоком сконцентрированной энергии СВЧ, в надежде вызвать научный и практический интерес к проблеме создания дистанционного способа проходки горного массива на радиофизическом принципе.

2. Взаимодействие электромагнитных волн СВЧ с горными породами

Известно, что процесс распространения электромагнитных волн СВЧ в различных средах, в том числе в различных породах-диэлектриках, зависит от их электрических свойств и параметров электромагнитного поля. В общем

случае, все параметры электромагнитного поля связаны с электрическими свойствами любых сред (ϵ , σ , μ) уравнениями Максвелла:

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu\vec{H} \\ \vec{D} &= \epsilon\vec{E} \\ \vec{j} &= \sigma\vec{E},\end{aligned}\tag{1}$$

где σ – проводимость среды, ϵ – диэлектрическая проницаемость, μ – магнитная проницаемость.

Энергия электромагнитного поля СВЧ связана с основными параметрами поля и среды следующим образом:

$$W = \frac{1}{8\pi} \int_V (\epsilon E^2 + \mu H^2) dW\tag{2}$$

Основное достоинство электромагнитной энергии СВЧ при оптимально выбранной рабочей частоте – это возможность её направленного проникновения в горную породу на небольшую глубину от поверхности в концентрированном виде. Известно, что с помощью сравнительно несложных устройств можно обеспечить направленность излучения энергии СВЧ в узком луче. В этом случае при интенсивном локальном воздействии энергией СВЧ на горную породу, в результате её поглощения ограниченным объёмом породы, определяемым сечением луча и глубиной его проникновения, создаётся значительный градиент температуры из-за разницы температур между нагреваемым объёмом и соседней необлучаемой областью. Крутизна этого градиента определяется уровнем излучаемой мощности СВЧ, диаграммой направленности излучателя (поперечными размерами луча), температурой нагрева и электрическими параметрами породы, определяющими степень проникновения энергии СВЧ в породу, величину поглощаемой ею и отражаемой от её поверхности энергии СВЧ.

В любом случае, при воздействия энергией СВЧ на горные породы, необходимо знание электрических свойств горных пород в исследуемом диапазоне частот, чтобы можно было определить оптимальные рабочие частоты и уровень мощности источника СВЧ для эффективного воздействия.

Основными параметрами горной породы при воздействии на неё энергией СВЧ являются: диэлектрическая проницаемость ϵ , электропроводность σ , коэффициент отражения электромагнитной волны от поверхности породы Γ и коэффициент поглощения (или затухания) энергии СВЧ в породе α . Все эти параметры тесно связаны между собой и изменение одного из них приводит к изменению других. Зная эти связи между параметрами, можно по некоторым известным параметрам определять другие, неизвестные параметры. Поскольку большое количество горных пород являются достаточно однородными диэлектриками, то рассеивание энергии СВЧ внутри породы не происходит. Электромагнитная волна распространяется как в обычном диэлектрике с потерями. Затухание (поглощение) энергии СВЧ происходит по экспоненциальному закону:

$$P_{\text{прох}} = P_{\text{вх}} e^{-\alpha z} \quad (3)$$

При рассмотрении вопроса об отражении электромагнитных волн от горной породы необходимо различать два случая:

1. Отражение от неэлектропроводных пород – несовершенных диэлектриков. Для них выполняется условие: $\sigma \ll \epsilon\omega$, где σ – проводимость, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, ω – угловая частота.
2. Отражение от электропроводных пород – несовершенных проводников. В этом случае $\sigma \gg \epsilon\omega$.

При рассмотрении несовершенных диэлектриков, имеющих конечную проводимость, необходимо учитывать потери. Диэлектрическая проницаемость в этом случае – величина комплексная:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon} \right), \text{ или}$$

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon''), \text{ где} \quad (4)$$

$\epsilon'' = \sigma / \epsilon_0 \omega$, ϵ' – действительная часть ϵ , ϵ'' – мнимая часть ϵ , ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства.

Мощность, отражаемую от породы, можно оценить, зная коэффициент отражения Γ .

Модуль волнового сопротивления породы определяется выражением:

$$|\rho_n| = 377 / \sqrt{\dot{\epsilon}} \quad [\text{ом}], \quad (5)$$

где $|\dot{\epsilon}| = \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2}$ – модуль диэлектрической проницаемости породы.

Коэффициент отражения по напряжению в случае раздела воздух-порода, равен:

$$|\Gamma| = (|\rho_n| - \rho_0) / (|\rho_n| + \rho_0), \quad (6)$$

где $\rho_0 = 377$ ом – волновое сопротивление свободного пространства. Зная Γ , можно определить отражаемую от породы СВЧ мощность:

$$P_{\text{отр}} = |\Gamma|^2 P, \quad (7)$$

где P – мощность источника СВЧ.

Мощность, поступающая в породу, равна:

$$P_0 = P(1 - |\Gamma|^2) \quad (8)$$

Постоянная распространения электромагнитных волн записывается в виде:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\dot{\epsilon}} \quad (9)$$

Так как $\dot{\epsilon}$ – комплексная величина, то γ имеет действительную и мнимую части:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)} \quad (10)$$

Действительная часть α есть коэффициент затухания, который может быть определён по формуле:

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\epsilon\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1\right)}{2}} \quad (11)$$

В случае неэлектропроводных горных пород, для которых токи проводимости малы по сравнению с токами смещения, т. е., $(\sigma / \omega \epsilon) \ll 1$, выражение для α упрощается:

$$\alpha = K\epsilon'' / 2 \epsilon', \quad (12)$$

где $K = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ – волновое число в диэлектрике.

Горные породы, в большинстве своём, являются диэлектриками, а диэлектрик обладает свойством поляризоваться под действием электрической составляющей электромагнитного поля.

Свойство пород поляризоваться в электромагнитном поле оценивается диэлектрической проницаемостью ϵ . Величина ϵ зависит от типа поляризации. Диэлектрическая проницаемость малопористых плотных горных пород обычно близка к ϵ слагающих их минералов. Диэлектрическая проницаемость газообразной фазы близка к 1, т. к. молекулы газов неполярны. Поэтому сухие, высокопористые осадочные горные породы имеют минимальную ϵ . Диэлектрическая проницаемость горных пород в электромагнитных полях СВЧ зависит от частоты. Зависимость эта объясняется некоторой инертностью поляризующихся молекул, атомов и электронов.

Существует угол поляризации, или угол Брюстера, при котором электромагнитная волна СВЧ, поляризованная нормально к плоскости падения и падающая под этим углом, будет только незначительно отражаться от поверхности породы.

Различные виды поляризации по-разному реагируют на повышение температуры.

Горные породы в электромагнитном поле СВЧ характеризуются ещё одним параметром – тангенсом диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Он характеризует ту часть электромагнитной энергии, которая выделяется в горной породе в виде тепла. Наличие примесей и воды увеличивает $\text{tg}\delta$.

С повышением напряжённости поля E $\text{tg}\delta$ и ϵ возрастают, притом тем резче, чем выше частота поля. С повышением $T^\circ\text{C}$ начинается рост $\text{tg}\delta$. Как известно, поляризация диэлектрика сопровождается поглощением энергии электромагнитного поля СВЧ, которая выделяется в объёме породы (зоне облучения) в виде тепла за счёт взаимного трения соседних полярных молекул при их поворотах вслед за изменениями направления электрического поля, то есть происходит диэлектрический нагрев горных пород, и чем выше частота, тем интенсивнее происходит нагрев. В случае влагосодержащих пород –

песчаников, поглощение энергии СВЧ значительно увеличивается из-за присутствия влаги в породе.

Мощность, выделяемая в единице объёма породы, оценивается следующим образом:

$$P = kfE^2 \text{ Вт /см}, \quad (13)$$

где E – напряжённость электрического поля (В/см), $k = 5,5 \times 10^{-7} \varepsilon'$, $\text{tg}\delta$ – коэффициент потерь, ε' – действительная часть ε породы-диэлектрика, δ – угол диэлектрических потерь.

Осуществляя интенсивный локальный нагрев породы-диэлектрика, энергией электромагнитной волны СВЧ за время, когда теплопроводность породы не оказывает заметного влияния на процесс воздействия, можно реализовать разрушение породы в квазиadiaбатическом режиме.

3. Исследования электрических свойств горных пород – диэлектриков в диапазоне СВЧ

Все электрические параметры горных пород (δ , σ , Γ , α , $\text{tg}\delta$) связаны между собой и необходимы для полного понимания всех происходящих в породе процессов и механизмов разрушения энергией СВЧ с учётом теплофизических параметров: теплопроводности, теплоёмкости и коэффициента линейного расширения.

Для исследования электрических свойств горных пород, главным образом диэлектриков (песчаников, гранитов и им подобных), в диапазоне СВЧ ($\lambda = 1,0 \div 20$ см) использовались волноводные методы измерений: метод холостого хода (х. х.); метод короткого замыкания (к. з.) и метод скошенного образца. Выбранные методы наиболее просты и позволяют с достаточной точностью измерять необходимые параметры, используя стандартную измерительную технику [1, 3, 5].

Для обеспечения точности измерений использовались образцы горных пород, тщательно обработанные и выдержанные в течение длительного времени в комнатных условиях.

Использование методов к. з. и х. х. и решение системы трансцендентных уравнений, полученных из рассмотрения электродинамической задачи для волновода, частично заполненного диэлектриком с потерями, а также используя известное выражение для постоянной распространения в диэлектрике, помещённом в волновод:

$$\gamma_\varepsilon = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{в}}} \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon'' \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}, \quad (14)$$

можно получить выражение, связывающее комплексную величину диэлектрической проницаемости с измеренными величинами: коэффициентом бегущей волны $K_{\text{б}}$, длиной волны λ_0 и сдвигом фазы θ первого минимума от грани образца в сторону генератора:

$$\frac{\varepsilon' - j\varepsilon'' \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2} = \left(\frac{1 - jK_{\text{б}1} \operatorname{tg}\theta_1}{K_{\text{б}1} - j\operatorname{tg}\theta_1} \right) \times \left(\frac{1 - jK_{\text{б}2} \operatorname{tg}\theta_2}{K_{\text{б}2} - j\operatorname{tg}\theta_2} \right), \quad (15)$$

где $K_{\text{б}1}$ и $K_{\text{б}2}$ – коэффициенты бегущей волны в режимах к.з. и х.х. соответственно; λ_0 – длина волны в свободном пространстве;

$\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны в волноводе;

θ_1 и θ_2 – фазовые сдвиги первого минимума от грани образца в сторону генератора в режиме к. з. и х. х. соответственно.

Фазовый сдвиг θ_m связан с расстоянием X_m от грани образца до первого минимума соотношением: $\theta_m = 2\pi X_m / \lambda_{\text{в}}$, где $\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в волноводе, заполненном диэлектриком.

Таким образом, по измеренным величинам $K_{\text{б}1}, K_{\text{б}2}, \theta_1, \theta_2, \lambda_0$ из уравнения (15), разделением действительной и мнимой частей, определяются ε' и ε'' .

Постоянная затухания вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]} \quad (16)$$

Для горных пород, имеющих малые потери ($\epsilon' \gg \epsilon''$), вычисление α упрощается:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta \quad (17)$$

На практике, метод к. з. и х. х. сводится к измерению КСВ (коэффициента стоячей волны) и одного первого минимума от грани образца в сторону генератора, при этом в одном случае образец плотно прилегает к короткозамыкающему волновод поршню, в другом – поршень сдвигается на расстояние, равное четверти длины волны в незаполненном диэлектриком волноводе, от задней грани образца.

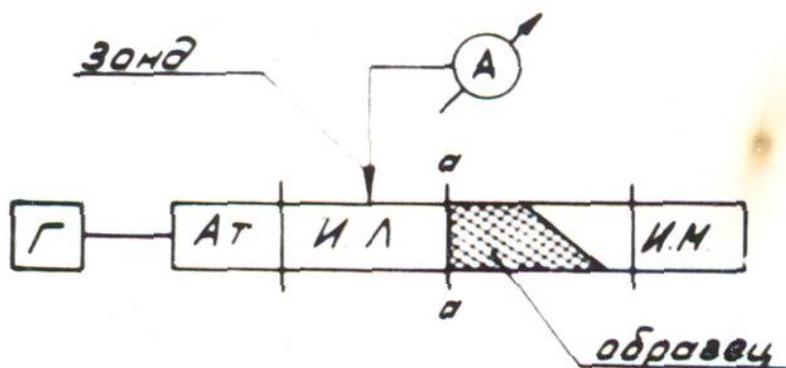


Рис.1. Блок-схема установки измерения параметров вещества

Г – генератор, Ат – аттенюатор, ИЛ – измерительная линия, ИМ – измеритель мощности, А – индикатор.

Блок-схема измерительной установки приведена на рис.1. Последовательность измерений: на измерительной линии отмечают положение максимума z_0 от короткозамкнутого поршня в отсутствие образца в измерительном тракте, а затем – при наличии образца.

Расстояние первого минимума определяется по формуле:

Опыт К.З.
$$\Delta x_{\text{к.з.}} = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2} - [(z_0 - z_{\text{к.з.}}) + d] \quad (18)$$

Опыт Х.Х.
$$\Delta x_{\text{х.х.}} = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2} - [(z_0 - z_{\text{х.х.}}) + d] \quad (19)$$

При измерении z_0 и z_m отсчёт ведётся от конца линии в сторону генератора.

Одновременно с определением положения минимума измеряют КСВ для опытов К.З. и Х.Х.

При значениях КСВ > 10 следует пользоваться методом удвоенного минимума (при квадратичной характеристике детектора). Измеряя $\lambda_{\text{в}}$ и ширину удвоенного минимума Δx , вычисляют КСВ по формуле:

$$K_c = \frac{\lambda_{\text{в}}}{\pi \Delta x} \quad (20)$$

Следует отметить, что метод К.З. и Х.Х. требует применения аппаратуры высокого качества, как и высокой точности изготовления образцов горных пород с параллельными гранями и толщиной менее половины длины волны в образце.

В этом случае погрешность измеренной диэлектрической проницаемости ϵ' не превышает 3%, а ϵ'' - 15%, и в основном определяется точностью измерения КСВ и x_m .

Метод скошенного образца позволяет измерить электрические параметры горных пород (например, коэффициент поглощения СВЧ мощности в породе α_{ϵ}), имеющих небольшие диэлектрические потери; в этом случае методы К.З. и Х.Х. практически неприемлемы из-за больших погрешностей в измерении. Метод скошенного образца основан на связи комплексного коэффициента отражения от поверхности образца с постоянной распространения в диэлектрике с потерями.

Одним из условий однозначной зависимости комплексного коэффициента отражения Γ от постоянной распространения в диэлектрике γ_{ϵ} является исключение влияния отражений от задней грани образца. Это достигается тем, что образец выполняется в виде клина, передняя грань которого перпендикулярна стенкам волновода, а задняя грань скошена под углом $30^{\circ} \div 40^{\circ}$ к широкой стенке.

Точность измерений обеспечивается в том случае, если отражённые волны возбуждаются только на передней грани образца. Все прочие отражения (от различного рода неоднородностей в породе, от скоса образца) приводят к

снижению точности измерений.

Если в волноводе распространяется волна типа H_{10} , то на границе области воздух – диэлектрик комплексный коэффициент отражения Γ связан с постоянными распространения в незаполненном волноводе (γ) и в волноводе, заполненном диэлектриком (γ_ϵ) выражением:

$$\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \frac{j\gamma}{\gamma_\epsilon} \quad (21)$$

Подставляя значения γ и γ_ϵ для диэлектриков с малыми потерями, получим:

$$\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \frac{\lambda_{B\epsilon}}{\lambda_B} \left[1 + \frac{j\epsilon''}{2} \left(\frac{\lambda_{B\epsilon}}{\lambda_0} \right)^2 \right], \quad (22)$$

где комплексный коэффициент отражения:

$$\dot{\Gamma} = \frac{\frac{\lambda_{B\epsilon}}{\lambda_B} - 1}{\frac{\lambda_{B\epsilon}}{\lambda_B} + 1} + j \frac{\lambda_{B\epsilon} \lambda_B \epsilon''}{\lambda_0^2 (1 + \frac{\lambda_{B\epsilon}}{\lambda_0})} \quad (23)$$

Выразим комплексный коэффициент отражения через его модуль и фазовый угол.

$$\dot{\Gamma} = |\Gamma| e^{-j\psi} \quad (24)$$

Модуль коэффициента отражения связан с коэффициентом стоячей волны в волноводе соотношением:

$$|\Gamma| = \frac{K_c - 1}{K_c + 1} \quad (25)$$

Фазовый угол φ может быть выражен через расстояние X_m первого минимума от передней грани образца к генератору:

$$\varphi = \pi - \frac{2\pi X_m}{\lambda_B} \quad (26)$$

Действительную и мнимую части коэффициента отражения вычислим из формул:

$$\text{Re}(\dot{\Gamma}) = \Gamma \cos\varphi \quad (27)$$

$$\text{Im}(\dot{\Gamma}) = \Gamma \sin\varphi \quad (28)$$

Следовательно, длина волны в диэлектрике равна:

$$\lambda_{B\epsilon} = \frac{1 + \text{Re}(\dot{\Gamma})}{1 - \text{Re}(\dot{\Gamma})} \lambda_B \quad (29)$$

По измеренным величинам λ_0 , λ_B , Γ , φ вычисляются числовые значения действительной части диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon' = 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_B}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{B\epsilon}}\right)^2 \quad (30)$$

и её мнимой части:

$$\epsilon'' = \frac{Qe(\Gamma)\lambda_0^2 \left(1 + \frac{\lambda_B}{\lambda_{B\epsilon}}\right)^2}{\lambda_{B\epsilon}\lambda_B} \quad (31)$$

Погрешность измерений диэлектрической проницаемости ϵ' не превышает 5%, диэлектрической проницаемости ϵ'' - 20%. Коэффициент поглощения в диэлектрике определяется из соотношения:

$$\alpha_\epsilon = \frac{\epsilon'' \pi \lambda_{B\epsilon}}{\lambda_0^2}, \quad (32)$$

α_ϵ [1 / м], где λ_0 и $\lambda_{B\epsilon}$ в метрах.

Коэффициент поглощения в горной породе – диэлектрике измеряется на установке со скошенным образцом. Принцип измерения заключается в том, что сначала измеряют мощность в волноводе без образца (P_1), а затем мощность, прошедшую через образец (P_2) и КСВ в тракте до образца.

$$\alpha_\epsilon = \frac{10}{l} \lg \left(1 + |\Gamma|^2\right) \frac{P_1}{P_2}, \quad (33)$$

где l – длина образца в метрах, $|\Gamma|^2$ рассчитывается. Размерность α_ϵ - дБ / м. Погрешность α_ϵ не превышает 10%.

Были измерены α , σ , Γ , ϵ' горных пород – диэлектриков: гранита, песчаника, мрамора и железистого кварцита (полупроводника) для сравнения. Результаты измерений приведены на рис.2 – 5.

Результаты измерений показывают, что диэлектрическая проницаемость горных пород – диэлектриков типа песчаника, гранита и мрамора зависят от частоты, в особенности с повышением температуры и влажности.

Изменение диэлектрической проницаемости с частотой обусловлено, прежде всего, поляризацией. Сухие, высокопористые осадочные породы имеют минимальную диэлектрическую проницаемость. Поляризация влажных пород

– диэлектриков обладает большей дисперсией.

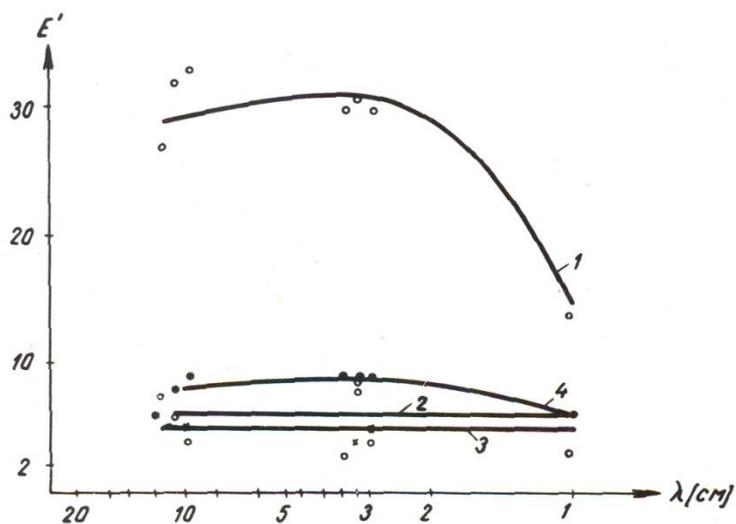


Рис. 2. Зависимость ϵ' от длины волны λ .

1 – железистый кварцит, 2 - песчаник (серый), 3 – гранит, 4 – мрамор (белый).

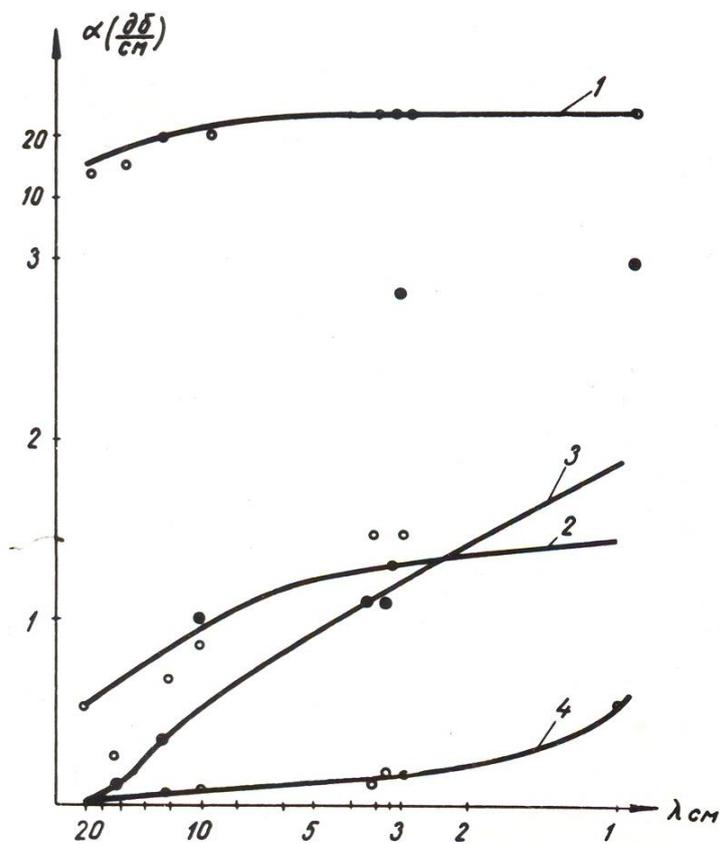


Рис. 3. Зависимость α от длины волны λ .

1 – железистый кварцит, 2 - песчаник (серый), 3 – гранит, 4 – мрамор (белый).

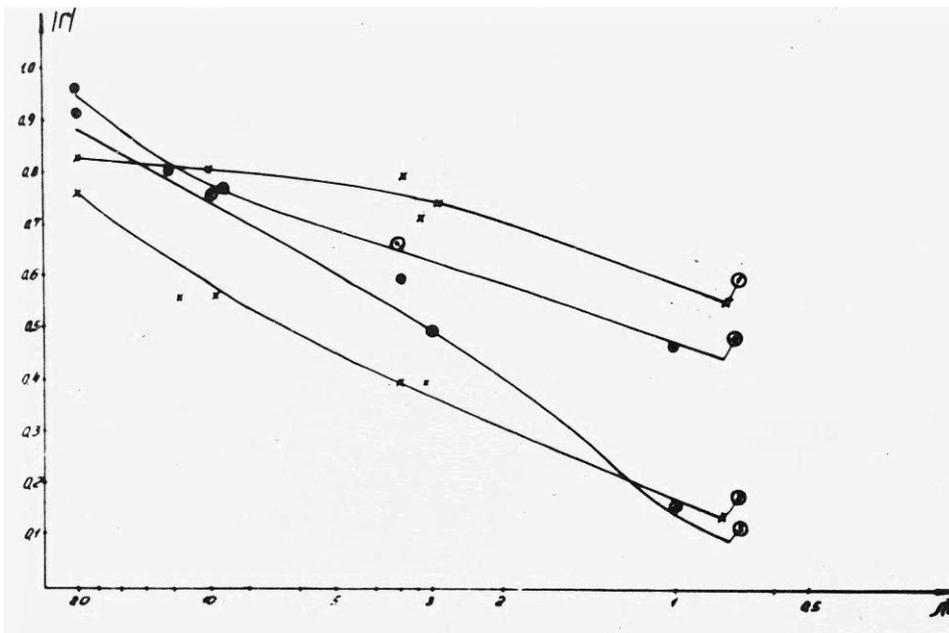


Рис. 4. Зависимость $|\Gamma|$ от длины волны λ .

1 – железистый кварцит, 2 - песчаник (серый), 3 – гранит, 4 – мрамор (белый).

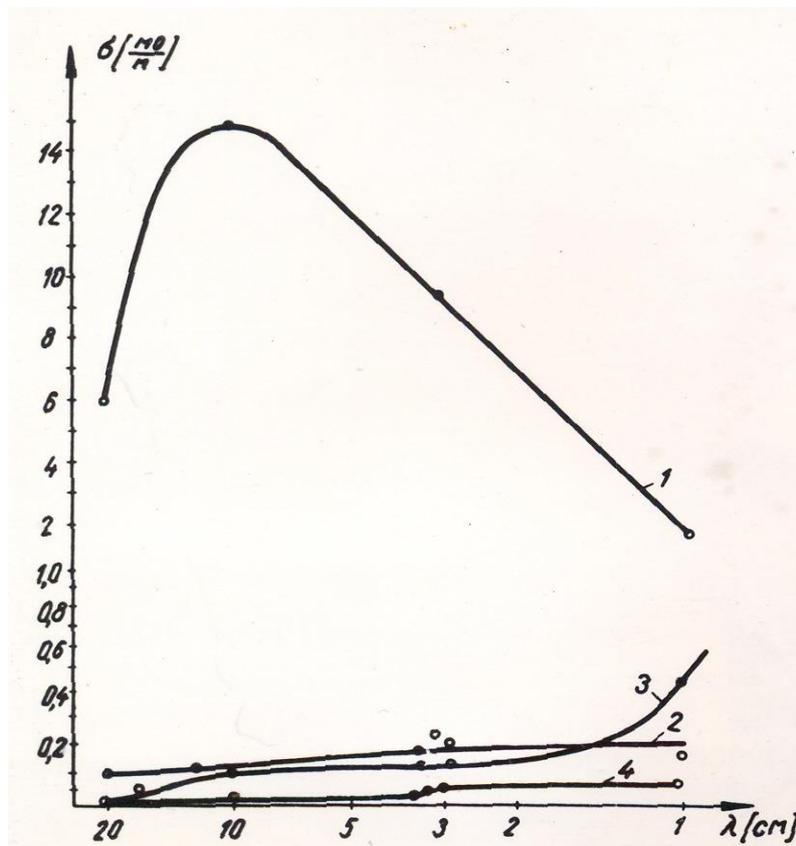


Рис. 5. Зависимость σ от длины волны λ .

1 – железистый кварцит, 2 - песчаник (серый), 3 – гранит, 4 – мрамор (белый).

Диэлектрическая проницаемость песчаников в диапазоне длин волн 1 – 20 см изменяется от 3 до 5; гранитов – от 6 до 8.

Следует отметить, что различные виды поляризации по-разному реагируют на повышение температуры. Так, за исключением ориентационной поляризации, остальные виды быстрее принимают максимальные значения за счёт уменьшения времени релаксации, а следовательно, повышают диэлектрическую проницаемость.

Электропроводность горных пород – диэлектриков с ростом частоты возрастает. С ростом температуры электропроводность пород-диэлектриков также увеличивается. Следовательно, с ростом температуры должны увеличиваться диэлектрические потери энергии СВЧ в горных породах, что соответствует увеличению $\text{tg}\delta$. Особенно это заметно у гранитов и в меньшей степени у сухих песчаников. Наличие же влаги увеличивает $\text{tg}\delta$ и коэффициент затухания электрической энергии СВЧ во влажных горных породах-диэлектриках с ростом частоты дополнительно возрастает.

Более широкий класс горных пород – диэлектриков (гранитов, песчаников и им подобных) подробно исследовался на длине волны 1,67 см в зависимости от температуры (до 1000°C) и влажности. Были исследованы диэлектрическая проницаемость ϵ' и $\text{tg}\delta$ одиннадцати типов пород магматического ряда интрузивного и диффузивного происхождения, а также девяти типов песчаников и двух известняков осадочного происхождения.

На рис.6 приведены экспериментальные и расчётные данные ϵ' и ϵ'' , $|\Gamma|$ и глубины проникновения энергии СВЧ для горных пород различного минерального состава при различных температурах.

По мере увеличения температуры облучаемой части породы, важно знать зависимость коэффициента отражения $|\Gamma|^2$ и глубины проникновения L от температуры. По данным ϵ' и $\text{tg}\delta$ рассчитывались коэффициент отражения $|\Gamma|^2$ и глубина проникновения L .

$$|\Gamma|^2 = \frac{\sqrt{\epsilon'} - 1}{\sqrt{\epsilon'} + 1}; \quad L = \frac{\lambda_0}{2\pi \text{tg}\delta \sqrt{\epsilon'}} \quad (34)$$

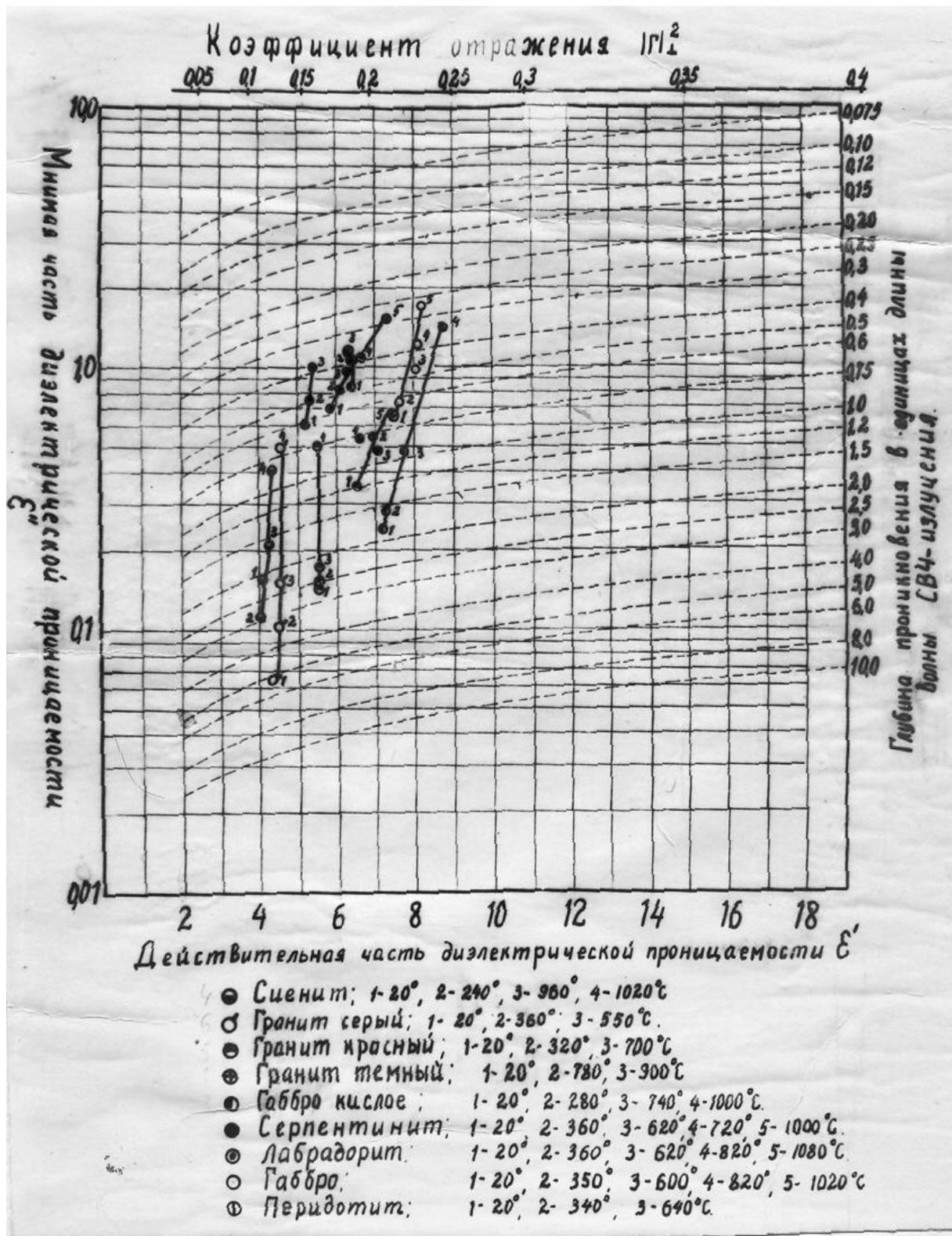


Рис. 6. Значения ϵ' и ϵ'' , $|\Gamma|$ и глубины проникновения для горных пород при различных температурах.

По мере увеличения в породах минералов групп оливина и пироксена ϵ' растёт. С ростом содержания кварца ϵ' уменьшается (при переходе от основных пород к кислым). В сиенитах, как и в гранитах, кварц отсутствует и они полностью состоят из щелочных полевых шпатов. Значения ϵ' магматических пород колеблется в пределах $4 \div 8$.

Коэффициент отражения магматических пород зависит от минерального состава и лежит в пределах от 0,12 до 0,23. Наблюдается некоторое его повышение при увеличении основности состава. Повышение температуры до 1000°C незначительно увеличивает отражение электромагнитной волны для кислых типов пород, однако для пород основного и ультраосновного состава коэффициент отражения может увеличиться на 25% от его значения при комнатной температуре.

Коэффициенты отражения и глубины проникновения восьми типов пород, определяемые при комнатной температуре и при 1000°C , сведены в Табл. 1.

Табл. 1

Порода	Γ/δ^2		L, cm^{-1}		L	
	при 20°C	при 1000°C	при 20°C	при 1000°C	при 20°C	при 1000°C
Перидотит	0,184	0,185	0,26	0,34	3,8	2,9
Серпентинит	0,190	0,215	0,26	0,45	3,8	2,2
Габбро	0,225	0,246	0,15	0,89	6,5	1,13
Лабрадорит	0,214	0,232	0,45	1,15	2,2	0,87
Гранит темный	0,154	0,160	0,50	0,81	2,0	1,23
Гранит красный	0,162	0,167	0,12	0,39	8,3	2,6
Гранит серый	0,127	0,135	0,057	0,42	17,5	2,4
Сиенит	0,114	0,123	0,14	0,36	7,2	2,8

Глубина проникновения в зависимости от минерального состава варьирует в значительных пределах. Замечено явное уменьшение проникновения СВЧ энергии при увеличении основности состава. Повышение температуры до 1000°C значительно уменьшает глубину проникновения. Для магматических пород она остаётся постоянной вплоть до температур $500 - 600^\circ\text{C}$. Резкое уменьшение глубины проникновения наблюдается при температурах порядка

700 - 900°C. Такой характер зависимости поглощающих свойств от температуры характерен для материалов с миграционными потерями (потери проводимости и потери тепловой ионной поляризации).

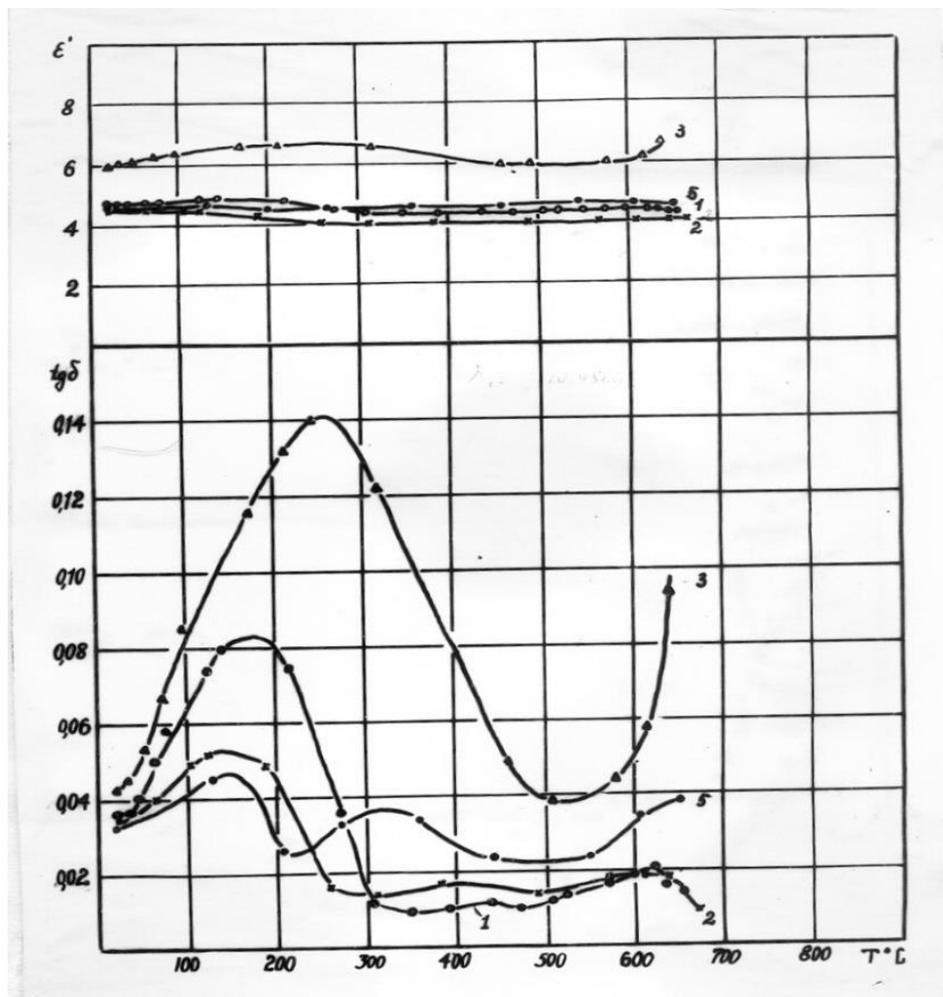


Рис. 7. Зависимость ϵ' и $\text{tg}\delta$ песчаников от температуры.

Содержание цемента: 1 - 33÷42%; 2 - 5÷10%; 3 - 45÷50%; 4 - 25÷30%

На рис. 7 приведены результаты измерений диэлектрических свойств песчаников с различным содержанием цемента. Для всех типов песчаников характерно наличие максимума в температурном ходе $\text{tg}\delta = f(T)$.

Начальное поглощение определяется количеством и качеством цемента. По мере нагрева величина $\text{tg}\delta$ растёт и при температуре около 150 - 250°C достигает максимума.

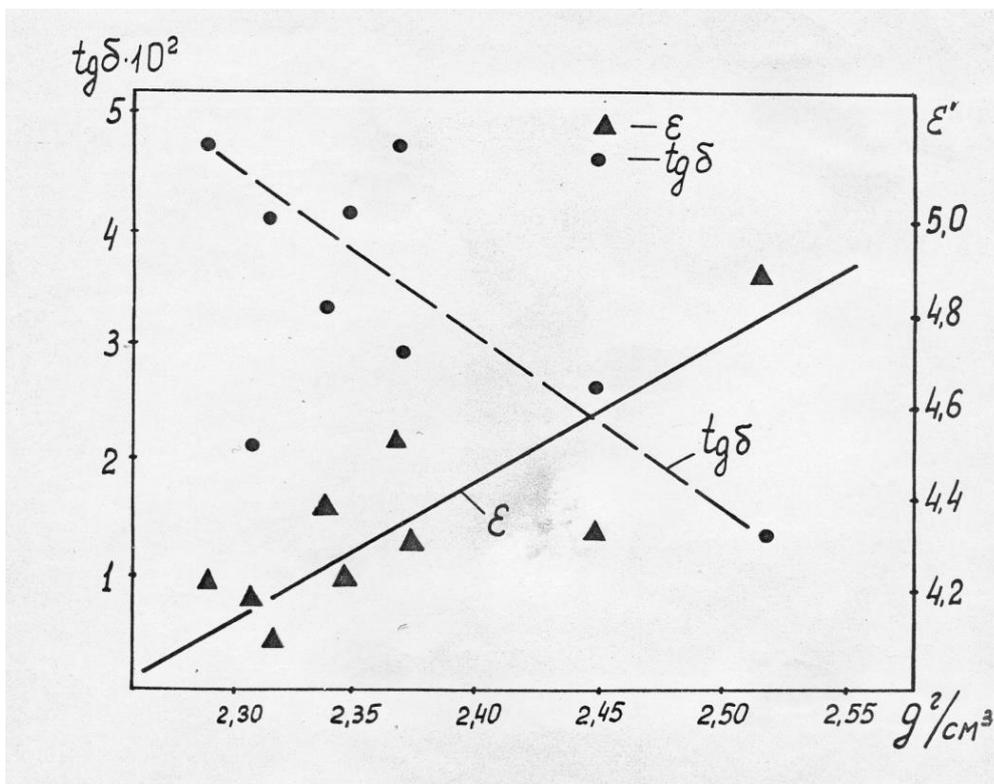


Рис. 8. Зависимость ϵ' и $tg\delta$ песчаников от объёмного веса ρ

Абсолютная величина максимума $tg\delta$ в случае песчаников увеличивается с увеличением содержания в образце влаги. Поэтому можно предполагать, что рост $tg\delta$ связан с релаксацией освободившихся при нагреве адсорбированных молекул воды. Этот факт подтверждают и опыты по снятию кривых обратного хода. По мере нагрева влага из объёма образца удаляется и максимумов в кривых обратного хода не наблюдается. Острота максимумов связана, очевидно, со скоростью фазового перехода воды в пар. Этот факт свидетельствует о наложении на дебаевский релаксационный процесс явления фазовых переходов, вследствие чего $tg\delta$ должен уменьшаться соответственно скорости удаления воды.

На рис. 8 показано, что диэлектрическая проницаемость песчаников увеличивается с увеличением плотности (увеличивается количество поляризующихся частиц в единице объёма), а $tg\delta$ уменьшается, так как уменьшается пористость, а значит, и величина адсорбционной поверхности, поглощающей воду.

На рис. 9 приведены значения комплексной диэлектрической проницаемости для 9 типов песчаников; диэлектрическая проницаемость $\epsilon^x = \epsilon' - j \epsilon''$, а также $|\Gamma|^2$ и L_ϵ в единицах длин волн в воздухе. Как видно из рисунка, диэлектрическая проницаемость для исследуемых песчаников не выходит за пределы 4,1÷4,6, а коэффициент отражения находится в пределах 0,11÷0,14. Различия по глубине проникновения более существенны.

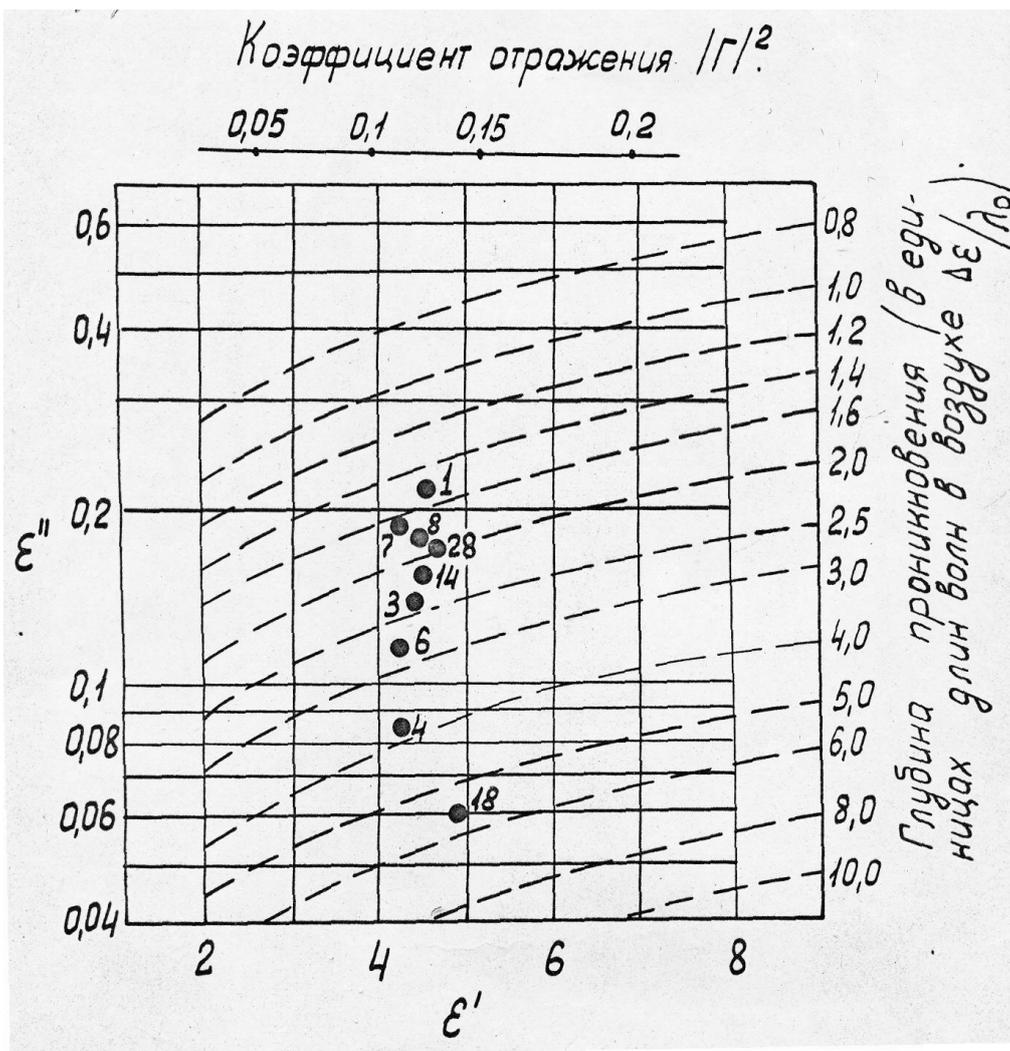


Рис. 9. Комплексная диэлектрическая проницаемость песчаников $\epsilon^x = \epsilon' - j \epsilon''$, $|\Gamma|^2$, L/λ

Образцы для измерений вырезались на камнерезном станке по сечению волновода и подгонялись по размеру 28,5×13,5 с точностью до 0,05 мм. Каждый образец измерялся дважды. Таким образом, электрические параметры породы определялись как среднее значение для 5 образцов и 10 измерений. После

изготовления образцы сутки выдерживались в комнатной атмосфере до достижения ими воздушно сухого состояния.

Определялись также объёмные веса каждого образца. В Табл. 2 приведены усреднённые данные ε' , ε'' , $\text{tg}\delta$, объёмного веса, коэффициента отражения $|\Gamma|^2$ и глубины проникновения.

Табл. 2

λ_g мм	ε'	$\varepsilon'' \times 10^2$	$\text{tg}\delta \times 10^2$	L ($L_\varepsilon / \lambda_0$)	$ \Gamma ^2$
54,3	4,53	2,13	4,70	1,5	0,13
54,3	4,37	1,44	3,30	2,6	0,12
54,3	4,17	0,85	2,04	4,1	0,117
54,3	4,30	1,27	2,87	3,35	0,123
54,3	4,23	1,96	4,65	1,7	0,118
54,3	4,10	1,81	4,07	1,8	0,11
54,3	4,35	1,70	2,46	3,15	0,124
54,3	4,34	1,78	4,10	2,0	0,118
54,3	4,30	0,61	1,27	5,5	0,138

4. Способы концентрации и ввода энергии СВЧ в горную породу [1, 3, 4, 5, 6, 7].

Создание способа концентрации энергии СВЧ в породе на некоторой глубине от поверхности с целью получения разрушающих градиентов

температуры и / или давления пара во влагосодержащих породах, является одной из важнейших задач, наряду с выбором рабочей частоты, уровня мощности СВЧ излучения, вводимого в породу, и определением основных электрических параметров горных пород в СВЧ диапазоне.

Для абсолютной концентрации энергии СВЧ в породе необходимы фокусирующие антенны для работы в ближней зоне, примером которых может служить эллиптическое зеркало. Считается, что такие фокусирующие системы как линзовые, на высоком уровне СВЧ мощности не практичны [3]. Сужение диаграммы излучения эллиптической антенны в фокусе позволяет значительно повысить плотность энергии СВЧ. Если облучаемая порода располагается в фокусе, где сечение луча минимально и имеет место плоский фронт волны, то часть энергии СВЧ может отражаться от породы в окружающее пространство. Однако именно такой способ позволяет вводить большую энергию СВЧ в породу дистанционно без контакта с ней, создавая локальное направленное воздействие на неё энергией СВЧ на небольшой глубине от поверхности. Это повышает эффективность воздействия энергией СВЧ на породу. Кроме того, важным свойством такого способа введения энергии СВЧ в породу является возможность дальнейшего повышения уровня мощности СВЧ излучения до наступления возможного электрического пробоя на дистанции от источника СВЧ до породы, в том числе и в самой породе с выходом на поверхность и к излучателю. Как известно, поперечные размеры луча S в эллиптическом излучателе определяются его размерами D (диаметром), расстоянием до объекта воздействия (порода) R_0 и длиной волны λ :

$$S_0 = 2\lambda R_0 / D \quad (35)$$

В таком луче будет находиться примерно 84% общей излучаемой мощности СВЧ. Средняя плотность мощности в рабочем сечении луча определяется выражением:

$$W_{0(ср)} = 0,3 P_{\Sigma} D^2 / \lambda^2 R_0^2, \quad (36)$$

где P_{Σ} - общая излучаемая мощность.

В центре луча по оси излучения плотность мощности может быть определена как:

$$W_{\text{оси}} = P_{\Sigma} D^2 / \lambda^2 R_0^2 \quad (37)$$

Таким образом, при оптимально выбранных D , R_0 и λ плотность мощности СВЧ можно повысить только увеличением выходной мощности источника СВЧ.

Окончательный вариант эллиптического излучателя, применяемого в исследованиях, имел размеры: $D = 1,5$ м, $R_0 = 1,8$ м, $r_0 = 0,95$ м.

Для дистанционного воздействия на горную породу (массив) энергией СВЧ технологически наиболее подходит именно такой фокусирующий излучатель в виде отражающего эллиптического зеркала и первичного облучателя – конического рупора (см. рис. 10).

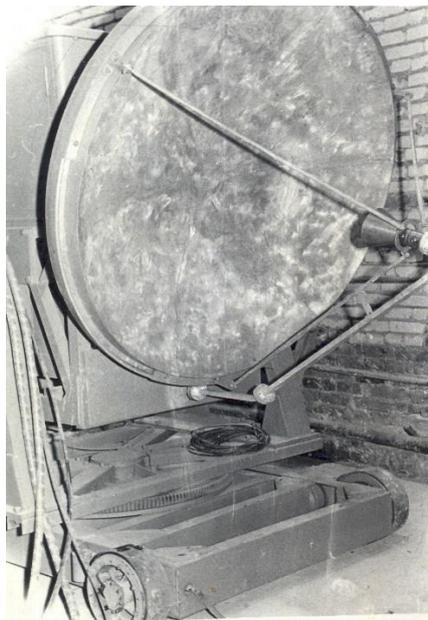


Рис. 10. Фокусирующий излучатель

Измерения, проведённые на низком уровне мощности с рупорным излучателем, а также измерения распределения температур на породе показали, что горные породы, являясь достаточно однородными по своей структуре, не рассеивают проходящую через них мощность СВЧ, а ведут себя как обычные диэлектрики. Ширина диаграммы направленности вводимого в породу СВЧ излучения в $\sqrt{\epsilon}$ раз уже, чем в свободном пространстве. Этот факт также способствует концентрации энергии в породе в узком луче (рис. 11).

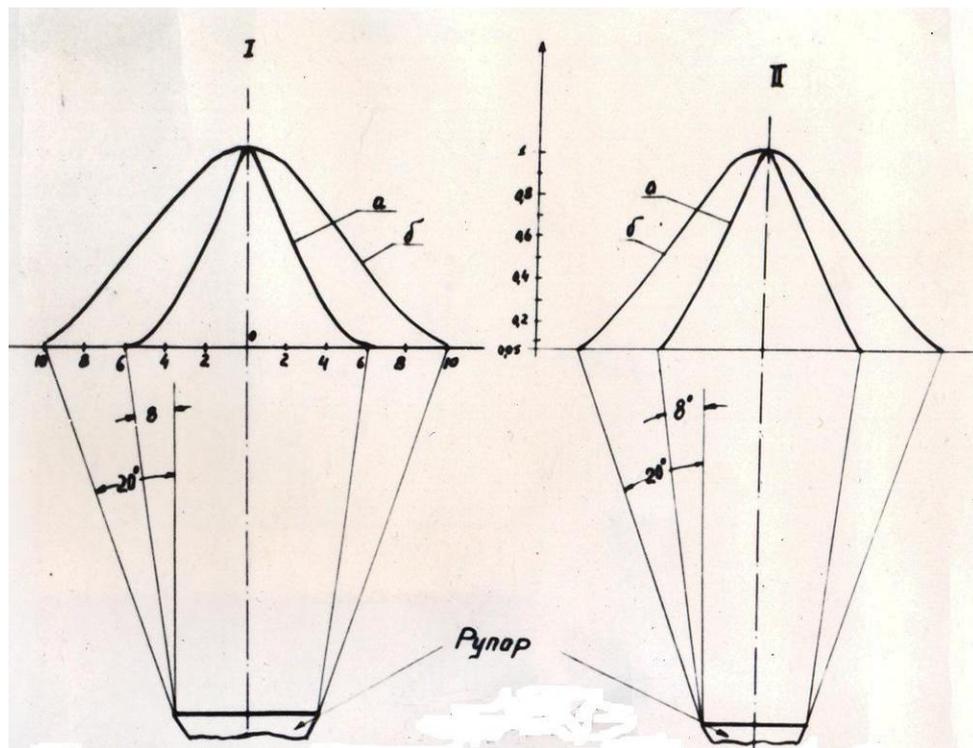


Рис.11. Диаграммы поля: а) в породе (гранит) $\epsilon_r = 7$; б) в воздухе.

Остановимся на одном из главных вопросов, сдерживающих развитие радиофизического (волнового) способа разрушения массива крепких горных пород - диэлектриков. Это возможность дальнейшего увеличения мощности источника СВЧ энергии. Как установлено экспериментально, скорость разрушения горных пород увеличивается (притом, нелинейно) с ростом плотности мощности СВЧ в породе. Но при достижении определённого уровня плотности мощности в некоторых местах на этапе передачи мощности СВЧ от источника к породе может возникнуть электрический пробой и лавинообразное образование плазмы СВЧ-разряда, экранирующей дальнейшее поступление энергии СВЧ в породу [8, 9]. Это наводит на мысль о необходимости уменьшения уровня плотности СВЧ излучения на участках, где создаются наиболее благоприятные условия для пробоя и возникновения плазмы. Кроме того, привлекает идея возможности создания перемещения фокуса в породе, ближе или дальше от поверхности породы. С этой целью предлагается [3]:

1. Увеличить общий уровень мощности СВЧ в породе путём сложения с помощью суммирующего устройства мощности от нескольких (2-х и более) источников СВЧ с уменьшенным в каждом источнике уровнем мощности.
2. Концентрировать энергию СВЧ на различной глубине от поверхности породы, изменяя фокусное расстояние с помощью суммирующего устройства.

На рис.12, 13, 14 даны расчётные и экспериментальные результаты сложения мощности и диаграмма суммирующего устройства от 2-х источников СВЧ излучения для различных расстояний до массива породы.

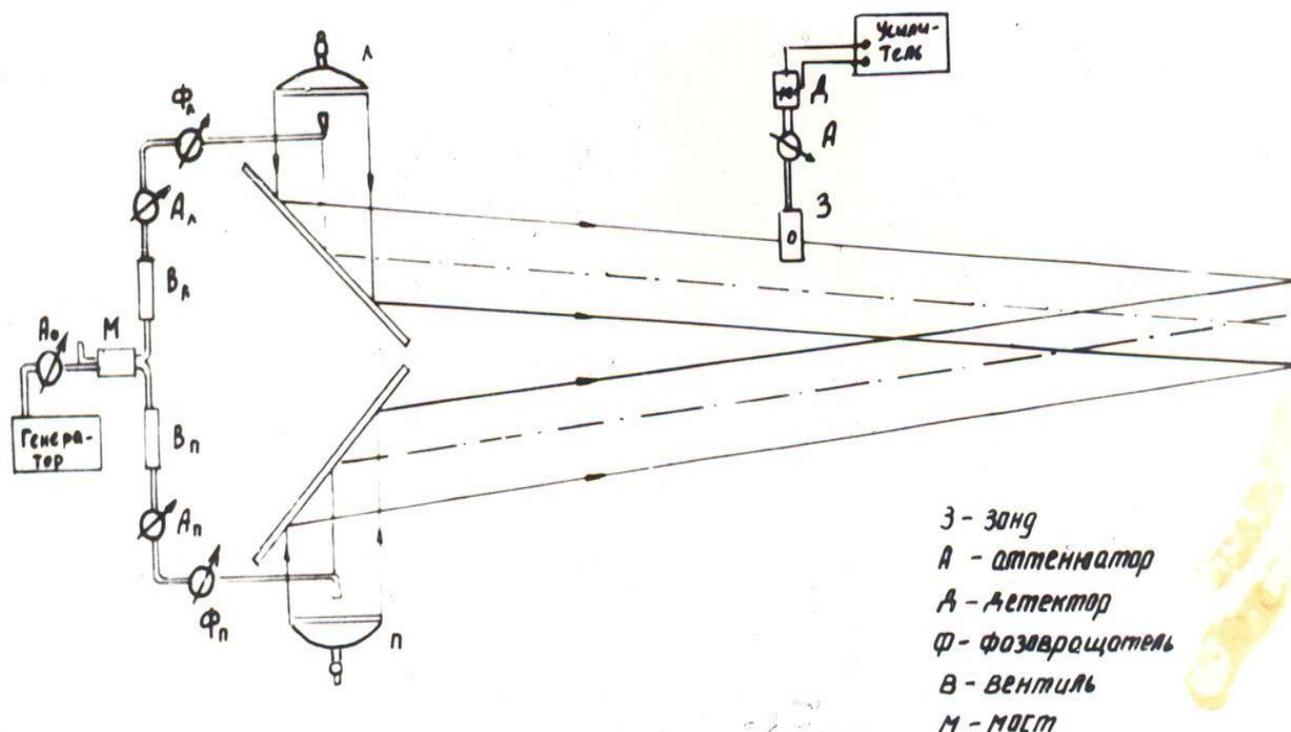


Рис. 12. Схема проверки принципа сложения полей в пространстве с суммирующим устройством.

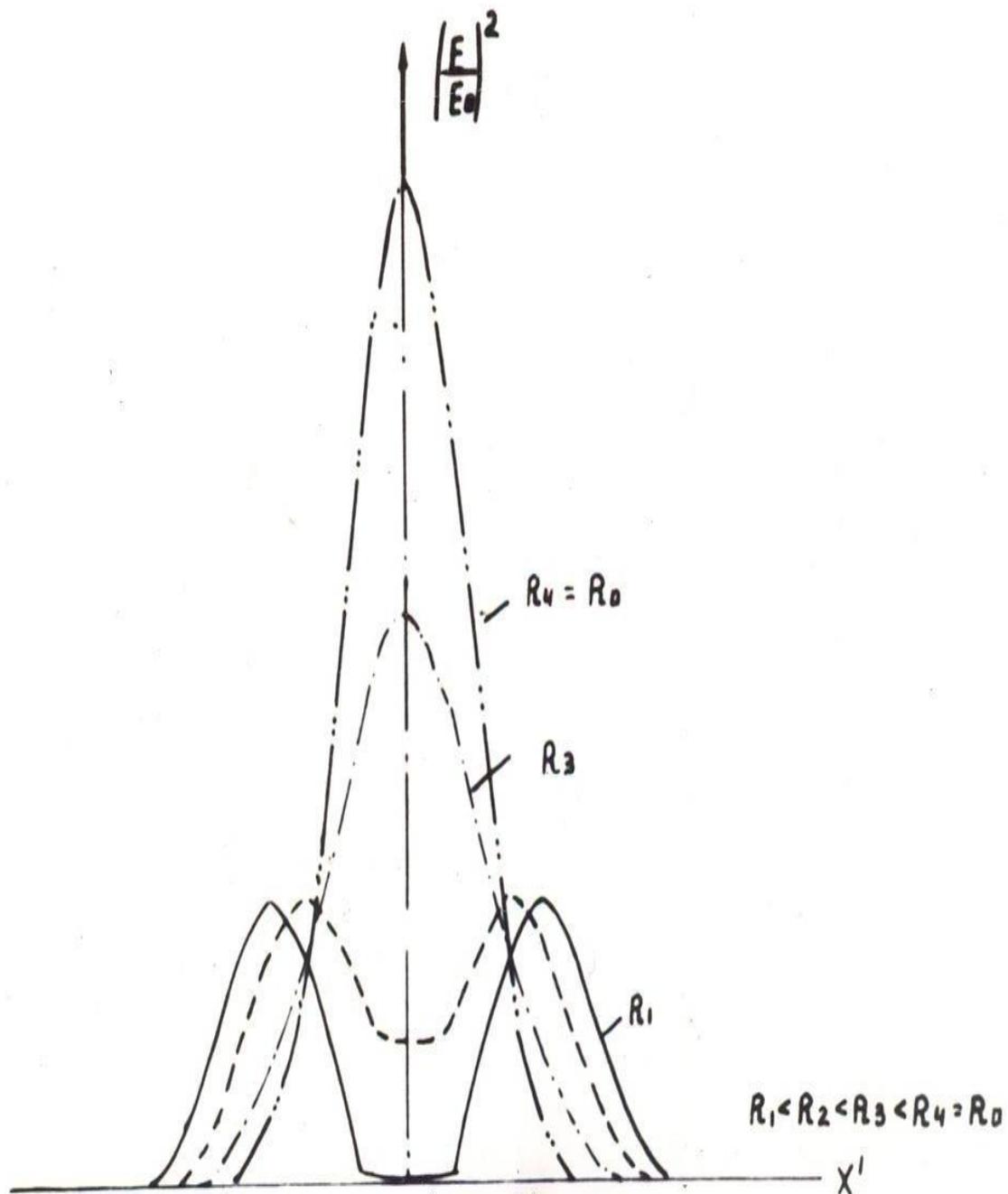


Рис. 13. Диаграммы суммирующего устройства на различных расстояниях от излучателя (расчёт).

Диаграммы поля суммирующего устройства
от двух источников.

а) $l_1 = 1\text{м}$ $\delta/l_1 = 7\text{м}$ $b/l_1 = 11\text{м}$.

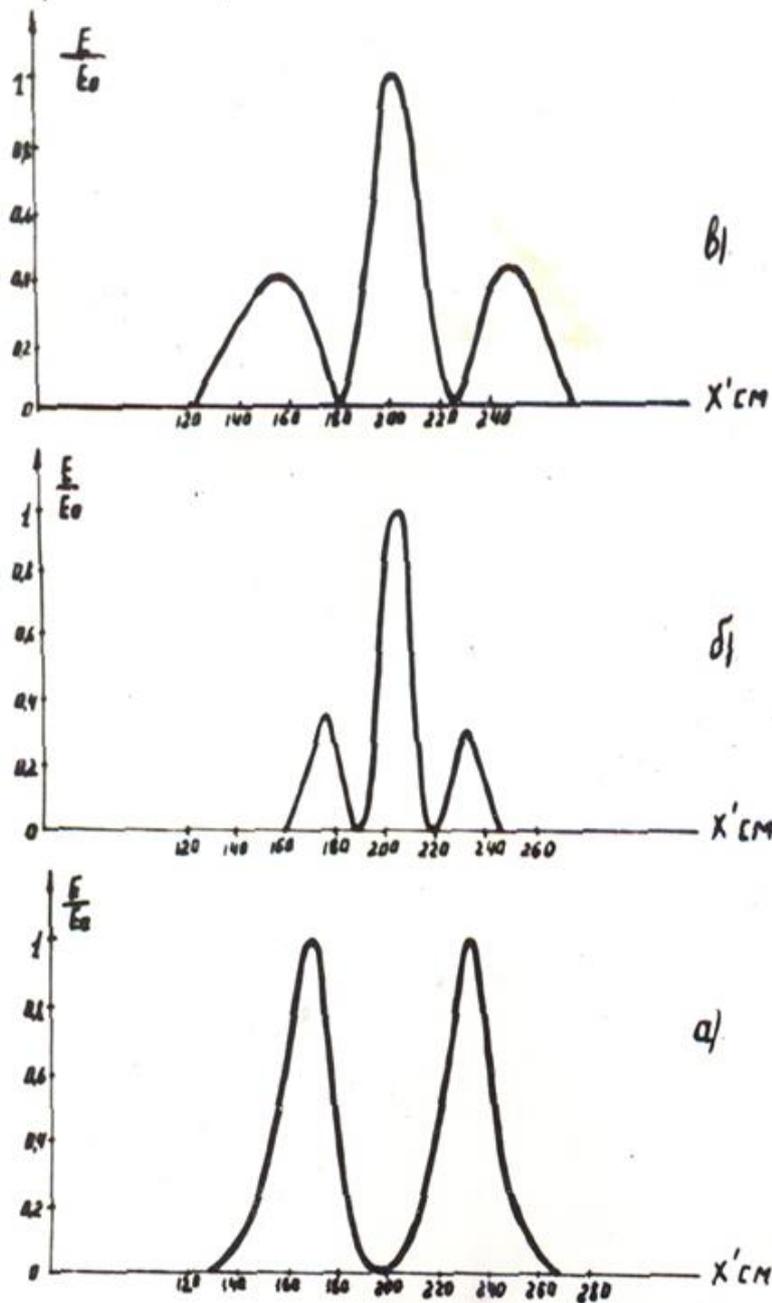


Рис. 14. Изменение диаграммы направленности поля суммирующего устройства с изменением расстояния (эксперимент, не в масштабе).

И наконец, плазменно-волновой способ концентрации тепловой энергии плазмы и электромагнитной энергии СВЧ для суммарного ввода её в массив горной породы, для его разрушения [4, 5, 6, 7]. Такое конструктивное решение проблемы значительного увеличения энергии СВЧ, вводимой в массив горной породы (тепловой и электромагнитной энергии СВЧ) для его разрушения, даёт возможность значительно увеличить мощность СВЧ излучения источника энергии, не опасаясь электрического пробоя и организации плазмы СВЧ-разряда, экранирующей поступление мощности СВЧ от источника к массиву.

Если плазму создать вдоль оси круглого волновода (например, с помощью дугового плазмотрона) в виде плазменной струи с конечной проводимостью и к ней подвести энергию СВЧ с помощью СВЧ электромагнитной волны H_{11} , то возбудится замедленная поверхностная волна H_{00} , обеспечивающая передачу энергии СВЧ вдоль плазменной струи в волноводе с выходом на массив породы без рассеивания в окружающее пространство. Благодаря высокотемпературному воздействию плазменной струи на породу ($\sim 3000^\circ\text{K}$) в массиве горной породы создаётся углубление, в которое вдоль плазменной струи направляется электромагнитная энергия СВЧ с круговой поляризацией вектора E и обеспечивает разрушение массива по периферии (рис. 15).

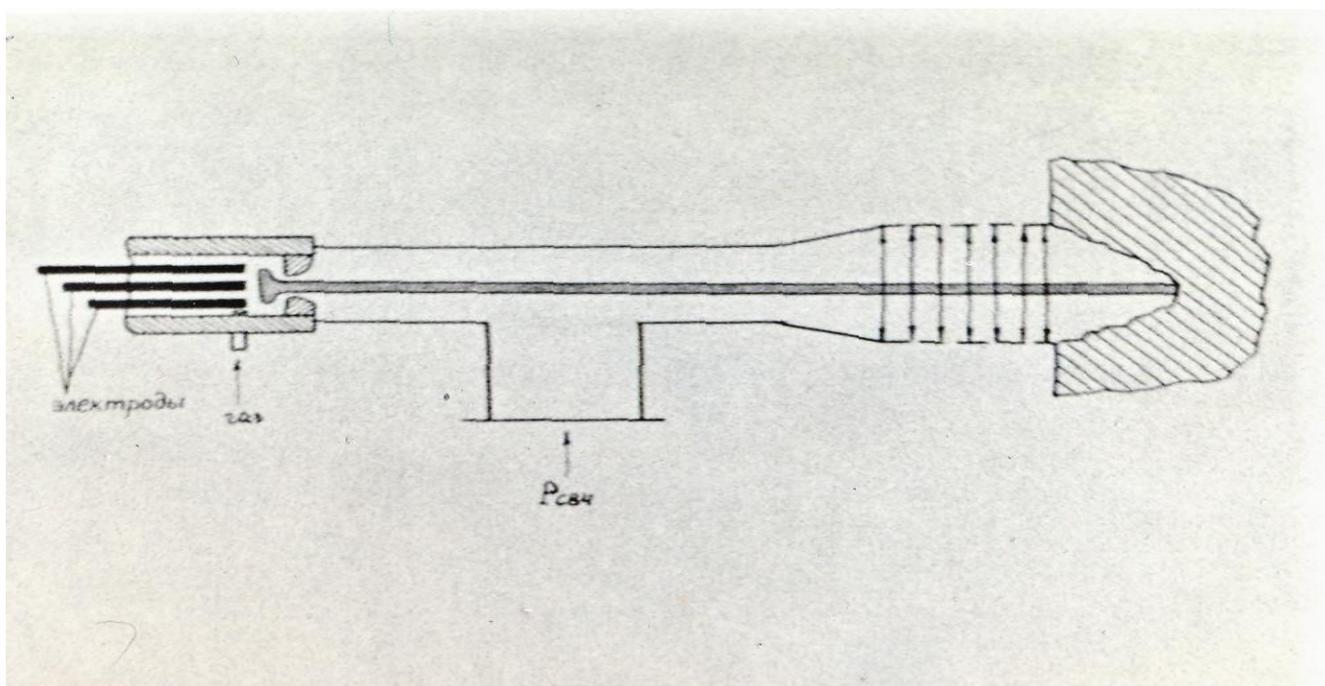


Рис. 15. Схема плазменно-волнового способа разрушения.

Как показывают расчёты [7], постоянная распространения электромагнитной волны H_{00} вдоль плазменной струи зависит от её проводимости σ . Например, для случая, когда диаметр плазменной струи составляет около 1 см, а температура газа (воздуха) свыше 3000°K, потери мощности СВЧ вдоль плазменной струи длиной 100 см, затраченные на её подогрев и поддержание необходимой длины, не превосходят 20%, при этом отражаемая от породы мощность СВЧ также частично поглощается плазмой для этих целей.

Достоинствами плазменно-волнового способа разрушения массива являются:

1. Возможность ввода в массив таким образом значительной мощности СВЧ и повышение производительности способа.
2. Высокий коэффициент передачи тепловой и электромагнитной энергии СВЧ в массив горных пород.
3. Возможность разрушения более широкого класса горных пород, считавшихся ранее прозрачными для волны 5 см, за счёт резкого повышения температуры поверхности массива и увеличения $\operatorname{tg}\delta$.

5. Разрушение крепких горных пород-диэлектриков направленным электромагнитным потоком сконцентрированной энергии СВЧ [1, 3, 5, 8 ÷ 12].

Для экспериментальной проверки радиофизического способа разрушения крепких горных пород в условиях, приближенных к массиву, была изготовлена опытная СВЧ установка на длине волны 5 см мощностью 50 кВт с фокусирующим эллиптическим излучателем (см. рис. 16), и подготовлен в полигонных условиях имитатор массива крепких горных пород-диэлектриков на основе песчаников Донбасса сечением 3×3 метра.

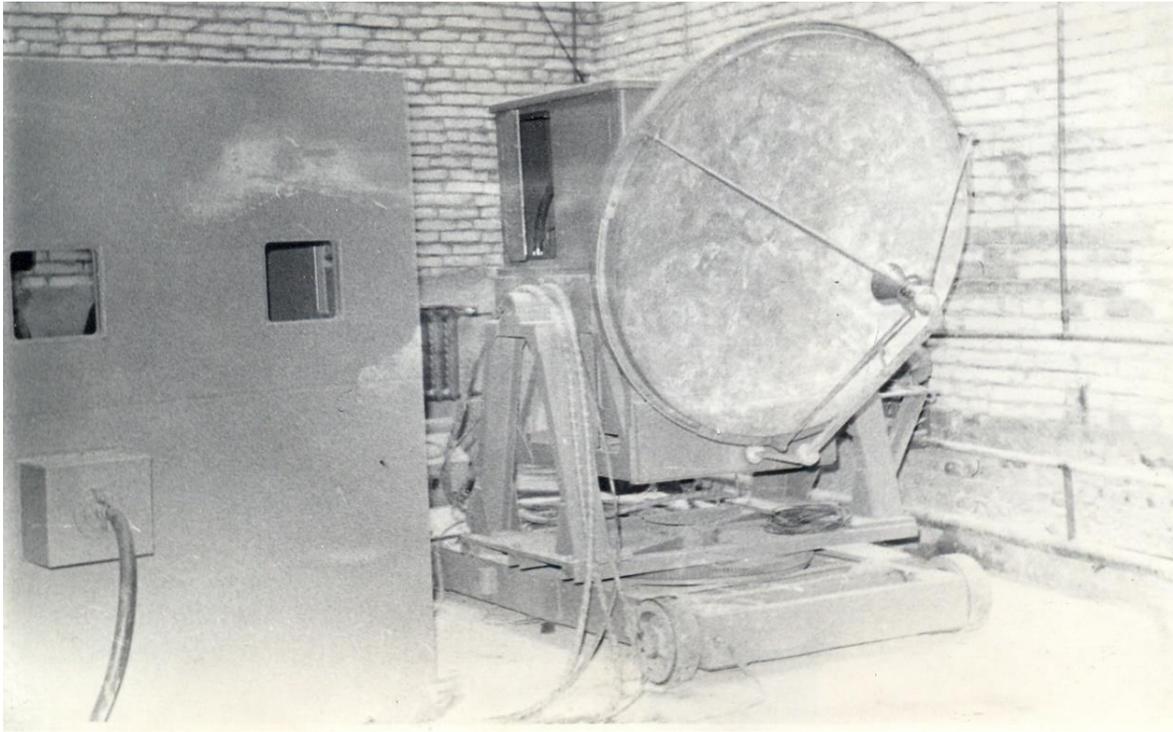


Рис. 16. Опытная СВЧ установка с кабиной УБС (вид спереди).

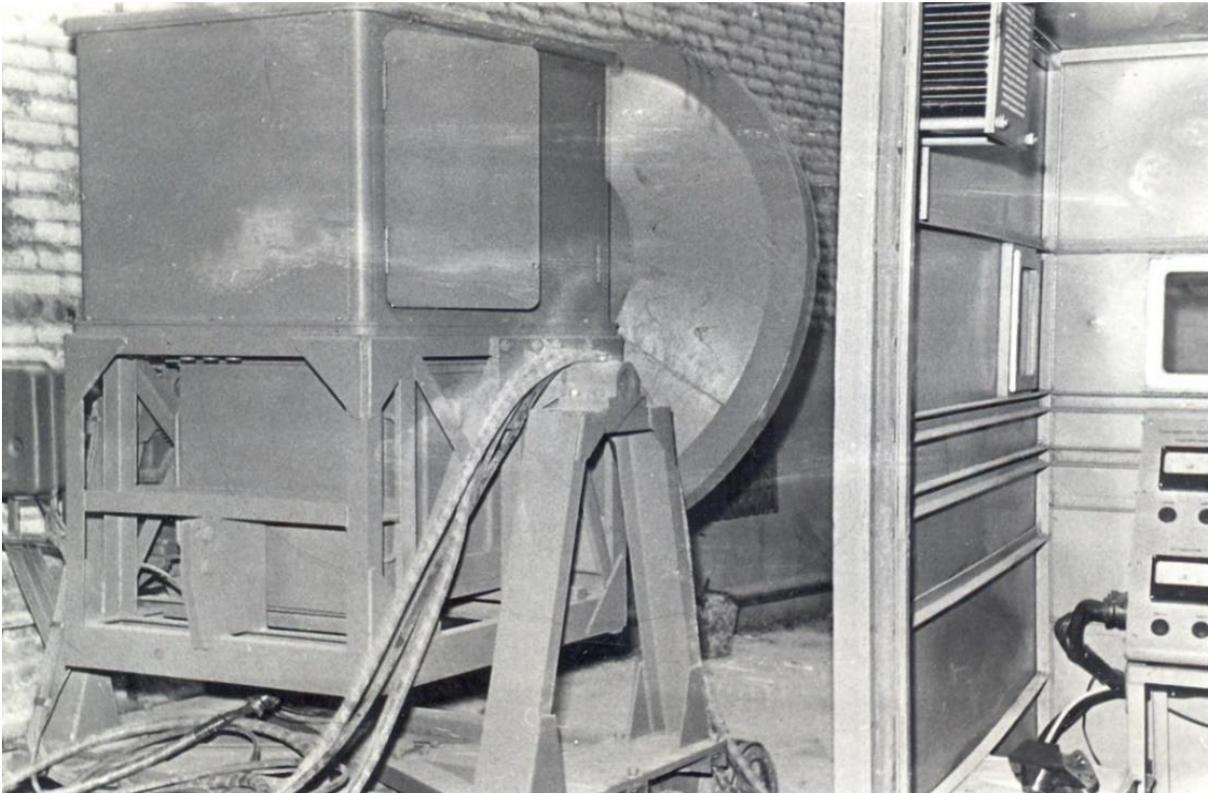


Рис. 17. Опытная СВЧ установка с кабиной УБС (вид сзади).

Основные блоки установки:

1. Блок источника энергии СВЧ, расположенный на небольшой перемещаемой платформе и совмещённый с блоком накала, волноводным трактом и рупорно-эллиптическим излучателем (рис. 17).
2. Высоковольтный выпрямитель.
3. Система водяного охлаждения источника энергии СВЧ.
4. Кабина управления системой УБС (рис. 17) (УБС – управление, блокировка, сигнализация).

В качестве источника энергии СВЧ использовался многорезонаторный усилительный клистрон, мощность от которого по волноводному тракту через ферритовый циркулятор и систему направленных ответвителей для измерения падающей и отражённой мощностей СВЧ, поступает в эллиптический фокусирующий излучатель. Для обеспечения горных выработок по поверхности массива сечением 3×3 м блок источника энергии СВЧ может перемещаться не только вперёд – назад, но и обеспечивать сканирование сконцентрированного электромагнитного потока энергии СВЧ по поверхности массива сечением 3×3 м перемещением блока источника по вертикали и горизонтали.

В качестве излучателя использовалось эллиптическое зеркало с диаметром раскрыва 1,5 м и фокусными расстояниями 0,95 м и 1,8 м. Первичным облучателем являлся конический рупор. Управление источником энергии СВЧ и сканированием электромагнитного потока осуществлялось из кабины управления.

Конструктивно блок питания накала оформлен с блоком источника энергии СВЧ в единый узел. Высоковольтный выпрямитель смонтирован на отдельном неподвижном агрегате.

Связь между выпрямителем, источником энергии СВЧ и кабиной управления осуществляется посредством высоковольтного кабеля и ряда силовых низковольтных кабелей.

Система водяного охлаждения используется для охлаждения источника энергии, электромагнита и волноводного тракта. Система является замкнутой и состоит из нагнетающего насоса, расширителя и радиатора охлаждения. Система располагается отдельно от других частей установки и соединяется с источником энергии СВЧ посредством шлангов.

Кабина управления включает в свой состав пульт управления, элементы контроля всей установки, блок питания задающего генератора и электромагнита, элементы релейного управления, защиты и сигнализации. Кабина управления экранирована от излучения СВЧ. Визуальный контроль за процессом разрушения осуществляется через смотровые окна, выполненные из металлизированного стекла.

Контроль уровня СВЧ излучения в камере осуществляется звуковым дозиметром с чувствительностью $5 \div 10$ мкВт / см² и серийным прибором ПО-1 (“Медик”).

В процессе исследований было установлено, что на выбранной длине волны 5 см в зависимости от электрофизических свойств горных пород и параметров СВЧ излучения (плотности мощности, размеров и местоположения зоны фокуса) разрушение происходит под действием термических напряжений (градиента температуры), либо под действием давления пара (градиента давления), образующегося во влагосодержащих породах, либо под их совместным действием.

Термические напряжения в горной породе возникают вследствие расширения породы при её неравномерном нагреве. Неравномерность и величина нагрева может быть обусловлена как неоднородностью поля СВЧ в породе, так и темпом нагрева, а также неоднородностью электрофизических свойств породы.

Температурное поле в горной породе при воздействии СВЧ излучения определяется в общем случае электрическими свойствами горной породы с учётом их изменения в зависимости от температуры и влажности и параметрами электромагнитного потока энергии СВЧ [1, 5, 21]. Процессы

массопереноса играют важную роль во влагосодержащих породах, особенно при достижении температур фазового перехода (испарения) и возникновении градиентов температур и давления пара. В случае “сухих” пород теплопроводность может существенно влиять на перераспределение тепла, однако в случае интенсивного воздействия, когда теплопроводность не успевает оказывать заметного влияния на величину и распределение температурного поля, процесс является макроквазиadiaбатическим при выполнении условия [12]:

$$\tau = \frac{10^{-2}}{\alpha \varepsilon'} \left(\frac{\Delta \lambda_0}{tg \delta} \right)^2, \quad (38)$$

где α , ε' и $tg \delta$ – температуропроводность, относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь породы соответственно, λ_0 - длина волны, Δ – допустимое относительное изменение температуры, не снижающее эффективность процесса нагрева.

Механизм разрушения под действием термических напряжений реализуется в породах с большим значением коэффициента термического расширения и модуля Юнга E , содержащих незначительное количество влаги ($< 0,1\%$). В этом случае величина температуры нагретой зоны и её распределение и местоположение относительно поверхности породы определяют вид разрушения: выкол или скол. Главным и определяющим является темп воздействия и уровень плотности мощности СВЧ.

Другим механизмом разрушения горных пород-диэлектриков является “взрывной”, когда разрушение происходит под действием внутреннего давления пара, образовавшегося в породе при испарении содержащейся в ней влаги. Эффективность разрушения в этом случае определяется с одной стороны влагосодержанием и процессами массопереноса пород, а с другой – параметрами направленного электромагнитного потока (длиной волны λ , плотностью потока мощности СВЧ и размером и местоположением зоны породы, подлежащей воздействию - рис. 18).

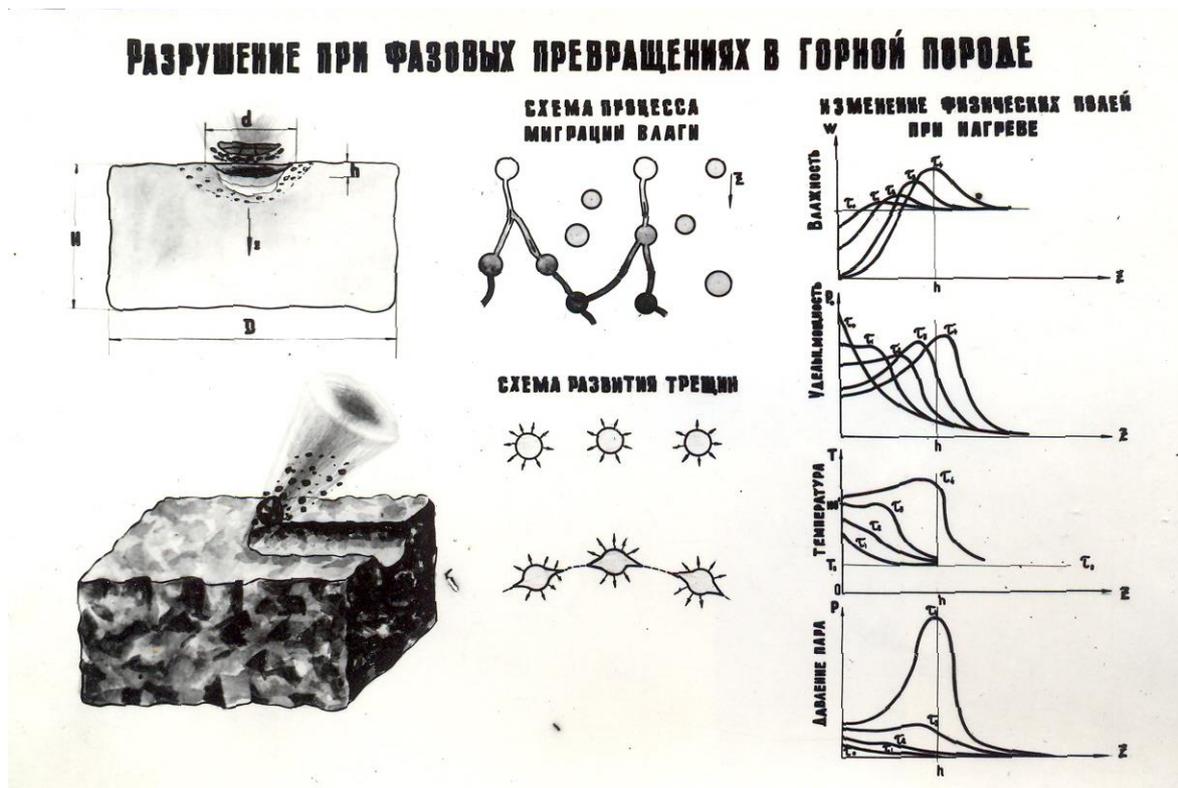


Рис. 18. Диаграмма разрушения в присутствии фазовых превращений.

В основе “взрывного” разрушения влагосодержащих горных пород (песчаников Донбасса) лежит процесс интенсивного локального поглощения влагой породы концентрированной энергии СВЧ в зоне СВЧ воздействия на породу, лавинообразного её испарения и создания в результате “взрывного” давления, разрушающего породу посредством скола с поверхности (скол в виде “шелушек”). Размеры продуктов и “громкость” процесса скола “шелушек” определяется уровнем влагосодержания породы, плотностью мощности СВЧ, размером и местоположением зоны воздействия и темпом воздействия (плавное или скачкообразное воздействие). Все эти параметры в конечном счёте определяют энергоёмкость процесса разрушения.

Песчаники Донбасса полевошпатно-кварцевого состава были представлены мелко-, средне- и крупнозернистыми разновидностями; содержание кварца изменялось от 50 до 80%, цемента – от 6 до 30%. При этом цемент был самым различным по составу (глинистым, карбонатным, смешанным и т. п.). Крепость песчаников изменялась от 6 до 15, влажность в водонасыщенном состоянии 0,7 – 2,0%, гигроскопическая влажность 0,1 – 0,45%, коэффициент

открытой пористости 2,5 – 7,5%, коэффициент абсолютной пористости 4,7 – 8,7%.

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.

Влажность породы, её массопереносные свойства и пористость существенно влияют на эффективность процесса разрушения, поскольку определяют степень поглощения энергии СВЧ и градиент давления пара [10 ÷ 12].

Электрофизические свойства песчаника (ϵ' , $\text{tg}\delta$) определяют эффективность взаимодействия пород с энергией СВЧ. При этом решающее значение, влияющее на темп взаимодействия имеет $\text{tg}\delta$ и уровень мощности

Длина волны электромагнитного потока существенно влияет на градиент температуры, так как определяет глубину проникновения СВЧ излучения в породу. Там, где длина волны не является оптимальной, этот недостаток можно компенсировать подбором уровня плотности мощности СВЧ, темпом воздействия и изменением местоположения “фокуса” в породе.

Размеры “фокуса” (зоны эффективного воздействия) и его местоположения в породе определяет градиенты температуры и давления в породе и тем самым эффективность её разрушения.

Плотность потока мощности СВЧ излучения оказывает решающее влияние на производительность и энергоёмкость процессов “взрывного” разрушения. Установлено, что:

1. Время разрушения уменьшается с увеличением уровня мощности СВЧ, подводимой к породе.
2. Объём разрушенной породы с поверхности в единицу времени возрастает с увеличением мощности.
3. При низких уровнях мощности СВЧ разрушение с поверхности (выкол, скол) не происходит.

Реализация квазиadiaбатического процесса “взрывного” разрушения, когда теплопроводность не оказывает заметного влияния на процесс, определяется уровнем мощности СВЧ излучения, размерами и местоположением зоны воздействия в породе и темпом нагрева.

Выбор рациональных параметров разрушения обеспечивает стабильность процесса разрушения, приемлемые размеры продуктов разрушения, высокую частоту их скола или выкола, и самое главное, даёт возможность существенно снизить энергоёмкость процесса разрушения до $20 \div 40 \text{ кВт} \times \text{час} / \text{м}^3$. [12].

Есть основания полагать, что энергоёмкость процесса разрушения натурального массива крепких горных пород-диэлектриков заметно понизится благодаря горному давлению, большей влажности и возможности оптимального управления в дальнейшем параметрами энергопотока СВЧ.

Предполагается, что уровень плотности потока мощности СВЧ в дальнейшем будет доведён до $800 \div 1000 \text{ Вт} / \text{см}^2$.

При плотности потока мощности СВЧ $450 \div 500 \text{ Вт} / \text{см}^2$, достигнутому в настоящее время, была реализована технологическая схема с предварительным нарезанием щелей сканирующим электромагнитным потоком концентрированной энергии СВЧ с последующим разрушением целиков этим же потоком с энергоёмкостью процесса $20 \div 40 \text{ кВт} \times \text{час} / \text{м}^3$. Целесообразность разрушения целиков механическим способом, как менее затратным на данном этапе, пока экспериментально не доказана.

Известно влияние воздействия электромагнитного СВЧ излучения на горные породы с целью ослабления их прочности [13, 14]. На этом эффекте развиваются способы комбинированного воздействия (энергией СВЧ и механической) на горные породы с целью создания возможности менее затратного их разрушения. Создаются электротермомеханические породоразрушающие устройства для бурения и комбинированного разрушения массива крепких горных пород [15 – 20, 23,24].

Пока это направление исследований находится в стадии становления.

6. Заключение

В результате проведённых исследований радиофизического (волнового) способа разрушения крепких горных пород направленным электромагнитным потоком сконцентрированной энергии СВЧ установлено, что:

1. Знание в диапазоне СВЧ электрических свойств горных пород-диэлектриков (песчаников, гранитов и им подобных) в зависимости от температуры и влажности, выбор оптимальной длины волны, уровня плотности мощности СВЧ излучения и темпа его воздействия, размеров зоны воздействия на породу и её местоположения в породе на небольшой глубине от поверхности, являются главными критериями успешного применения направленного электромагнитного потока сконцентрированной энергии СВЧ для обеспечения непрерывного “взрывного” разрушения массива крепких горных пород-диэлектриков.
2. Механизм “взрывного” разрушения сухих и влагосодержащих горных пород-диэлектриков направленным сканирующим электромагнитным потоком сконцентрированной энергии СВЧ при плотности мощности потока 400 Вт / см^2 и более обеспечивает непрерывный выкол или скол частей породы с её поверхности за счёт высоких, практически скачкообразных, градиентов температуры или давления, или за счёт их совместного воздействия в квазиadiaбатическом режиме, когда теплопроводность породы не успевает оказывать заметного влияния на процесс разрушения.
3. Влажность породы и оптимальные параметры электромагнитного потока существенно увеличивают эффективность “взрывного” разрушения.
4. Производительность способа разрушения растёт нелинейно с увеличением плотности мощности СВЧ излучения, а энергоёмкость, наоборот, падает.

5. Необходимо продолжить исследование способа в реальных условиях массива, увеличив уровень плотности мощности СВЧ в породе до $800 \div 1000 \text{ Вт} / \text{см}^2$ $\text{Вт} / \text{см}^2$ с целью:
 - 5.1. Определения оптимальной технологической схемы взрывного разрушения массива крепких горных пород-диэлектриков сканирующим электромагнитным потоком сконцентрированной энергии СВЧ;
 - 5.2. Повышения производительности способа;
 - 5.3. Уменьшения энергоёмкости способа “взрывного” разрушения массива крепких горных пород-диэлектриков;
 - 5.4. Автоматизации управления технологическим процессом “взрывного” разрушения массива.
 - 5.5. Расширения диапазона горных пород-диэлектриков, подлежащих взрывному разрушению энергией СВЧ.

Литература

1. «Исследование возможности применения приборов “М”-типа для разрушения горных пород». Научно-технический отчёт (НТО) по теме «Гранит». Москва, ИГД им. А.А. Скочинского, 1965 г.
2. «Разработка установки для разрушения горных пород энергией СВЧ» НТО по теме «Гранит I». Москва, ИГД им. А.А. Скочинского, 1968 г.
3. «Исследования и определение новых областей применения мощных приборов СВЧ в народном хозяйстве и электронной технике». НТО по теме «Эксперимент». Москва, ИГД им. А.А. Скочинского, 1965 г.
4. Блинов Л. М., Гонтарев Г. Г., Кравченко В. С., Образцов А. П. «Способ разрушения горных пород» Авторское свидетельство №261330 с приоритетом от 27. 12. 1968.
5. Блинов Л. М. «Исследования разрушаемости крепких горных пород энергией СВЧ с целью создания средств разрушения массива». Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук, Москва, ИГД им. А.А. Скочинского, 1970.

6. Блинов Л. М., Ковальчук В. М. «О возможности комбинированного плазменно-волнового воздействия на горные породы». Тезисы доклада на II Всесоюзной конференции по термомеханическому разрушению горных пород. Днепропетровск, 1972.
7. Блинов Л. М., Образцов А. П. «Расчёт параметров распространения электромагнитной волны вдоль проводящего стержня». Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского, вып. 91. Москва, 1972.
8. Блинов Л. М., Ковальчук В. М., Красновский С.С., «Образование плазменного факела при воздействии на горную породу энергией СВЧ» Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского, вып. 104. Москва, 1972
9. Блинов Л. М., Ковальчук В. М., Красновский С. С., Образцов А. П. «Образование и движение плазменных сгустков в поле СВЧ излучения при радиоволновом разрушении горных пород» Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского, вып. 126. Москва, 1975.
10. Блинов Л. М., Красновский С. С., Образцов А. П. «Экспериментальные исследования взрывного разрушения горных пород в электромагнитном поле СВЧ». II Всесоюзная конференция по термомеханическому разрушению горных пород. Сб. статей. Днепропетровск, 1972.
11. Блинов Л. М., Красновский С .С., Образцов А. П. «Особенности разрушения горных пород в СВЧ поле в зависимости от их физических свойств и условия реализации некоторых механизмов разрушения» Всесоюзная конференция вузов с участием ИГД. Москва, 1974.
12. Красновский С. С. «Исследование взаимодействия электромагнитных полей ВЧ и СВЧ с горными породами для разработки способов и средств их разрушения». Диссертация в форме научного доклада на соискание учёной степени кандидата технических наук. Москва, ИГД им. А. А. Скочинского, 1999.

13. Блинов Л. М., Уваров А.П., Цыганенко С. М. «Исследование комбинированного способа бурения горных пород с применением электромагнитных полей СВЧ и механического воздействия» Тезисы доклада на Всесоюзной конференции вузов с участием ИГД. Москва, 1974.
14. Блинов Л. М., Козлов Ю. Н., Уваров А. П. «Об изменении сопротивляемости горных пород разрушению при комбинированном (СВЧ и механическом) воздействии». Труды III Всесоюзной конференции по термомеханическим методам разрушения горных пород. Тезисы доклада. Москва, 1976.
15. Образцов А. П., Блинов Л. М., Цыганенко С. М. «Устройство для электромеханического разрушения горных пород». Авторское свидетельство №394547 с приоритетом от 3. 12. 1974.
16. Образцов А. П., Блинов Л. М., Цыганенко С. М. «Электротермомеханический породоразрушающий орган». Авторское свидетельство № 435356 с приоритетом от 14. 03. 1972.
17. Образцов А. П., Блинов Л. М., Цыганенко С. М. «Коронка для электротермомеханического разрушения горных пород». Авторское свидетельство №790273 с приоритетом от 3.12. 1971.
18. Блинов Л. М., Двинских В. А., Образцов А. П., Цыганенко С. М. «Установка для электротермомеханического разрушения горных пород». Авторское свидетельство №576406 с приоритетом от 30. 11. 1973.
19. Образцов А. П., Блинов Л. М., Цыганенко С. М. «Электротермомеханический породоразрушающий инструмент» Авторское свидетельство №530951 от 4. 11. 1974.
20. Цыганенко С. М., Глатман Л.Б., Блинов Л. М. «Электротермомеханический породоразрушающий орган проходческого комбайна». Авторское свидетельство №1659650 с приоритетом от 19. 06. 1989.
21. Красновский С.С. «Особенности формирования и расчёт температурных полей в горных породах с зависящими от температуры электрическими

свойствами при ВЧ и СВЧ воздействии» Тезисы II Всесоюзной конференции, стр. 71- 74, 1981.

22. Долголаптев А.В., Вороновский Ю.Д., Красновский С.С., Рябец Н. И., Миронов В. П., Хочинский В. А. «Способы ВЧ контактного и СВЧ-механического разрушения крепких скальных и мёрзлых горных пород». Тезисы доклада. Якутск, Якутский научный центр, 1994. стр. 41 – 45,
23. Долголаптев А.В., Вороновский Ю.Д., Красновский С.С., Нистратов В. Ф., Образцов А. П., Уваров А. П. «Новая технология разрушения массива крепких горных пород с использованием энергии электромагнитного поля». Научные сообщения ННЦ ГП- ИГД им. А. А. Скочинского, вып. 308, стр. 115 – 121. Москва, 1998.
24. Долголаптев А.В., Вороновский Ю.Д., Красновский С.С., Максименко А. Г., Нистратов В. Ф., Образцов А. П. «Разрушение крепких горных пород в массиве на основе комбинированных электрофизических способов». Доклад на конференции «Неделя горняка» в МГГУ. Москва, 1998.

Для цитирования:

Л. М. Блинов, А. П. Герасименко, Ю. В. Гуляев, А. В. Долголаптев, В. А. Черепенин. О возможности создания технологии “взрывного” разрушения массива горных пород – диэлектриков направленным электромагнитным потоком концентрированной энергии СВЧ. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.4