Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им. Г.В.Плеханова, 1984, т. 99

УДК 622.236.722 : 622.271.7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОТТАЙКИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Ю.М.МИСНИК, В.А.ХОМИНСКИЙ, О.Б.ШОНИН, Н.И.РЯБЕЦ

Одним из способов подготовки мерзлых пород к экскавации является оттаивание. Однако применение для этой цели традиционных методов нагрева нельзя признать удовлетворительным как из-за невысокого темпа оттайки, обусловленного низкой теплопроводностью мерзлых пород, так и вследствие отрицательного влияния источников нагрева на тепловой режим выработки. Для создания ускоренных методов оттайки представляет интерес использование энергии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний, нашедшей в последнее время применение в различных областях науки и техники для ускорения и повышения качества технологических процессов.

Физическими и технологическими предпосылками ее применения послужили следующие особенности взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с мерзлыми породами [I]: объемный характер нагрева, обусловленный непосредственным преобразованием СВЧ энергии в тепловую вследствие поляризации мерзлой породы в СВЧ электромагнитном поле; малый вклад теплопроводности в формирование температурного поля по сравнению с действием внутренних тепловых источников, созданных поглощением электромагнитной энергии; технологически приемлемые глубины оттайки (0,I-0,6 м), достигаемые за время электромагнитного воздействия порядка нескольких минут; возможность бесконтактной передачи СВЧ энергии в породу при высоком КПД ее использования.

Указанные параметры оттайки наряду с возможностью конструктивной и электромагнитной совместимости СВЧ техники с горным оборудованием позволяют использовать этот вид энергетического воздействия для подготовки мерзлых пород к экскавации в ряде технологических процессов при ведении горных, геолого-разведочных и строительных работ в зоне распространения многолетней мерзлоты, таких как разработка мерзлых россыпей в подземных условиях, проходка шурфов при геологоразведке и сооружении опор различного назначения, эксплуатационное опробование, экстренное вскрытие зон аварий на подземных инженерных сетях и т.д.

Независимо от технологии применения СВЧ энергии всегда возникают вопросы, на какую глубину целесообразно оттаивать породу с заданными свойствами при тех или иных параметрах электромагнитного воздействия, каково оптимальное время оттайки, и, наконец, какова энергоемкость данного процесса.

Рассмотрим нагрев массива мерзлой породы в случае нормального падения на ее поверхность плоской электромагнитной волны, когда плотность потока энергии S зависит лишь от координаты z, отсчитываемой в глубь массива от

его поверхности. Такое приближение оправдано тем, что поглощение электромагнитной энергии происходит в ближней зоне излучателя, где растекание энергии еще не успевает проявиться.

При оттайке мерзлых пород наибольший интерес представляет закономерность движения фазового фронта и в меньшей степени распределение температур. Поэтому можно отказаться от полного рассмотрения задачи Стефана и получить закон движения фазового фронта, исходя из следующих соображений. Электрические свойства пород в мерзлом и талом состояниях настолько отличны между собой, что подлинную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ от температуры T можно аппроксимировать ступенчатой функцией со скачком в точке $T = 0$, усредняя $\varepsilon_м$ и $\varepsilon_т$ отдельно для мерзлой и талой областей. Характерные значения относительной диэлектрической проницаемости ε' и фактора потерь ε'' в зависимости от типа пород составляют на частоте 2375 МГц: $\varepsilon'_м = 3\text{–}7$; $\varepsilon''_м = 0{,}1\text{–}3$; $\varepsilon'_т = 10\text{–}25$; $\varepsilon''_т = 2\text{–}7$ [4].

При принятой аппроксимации $\varepsilon(T)$ массив в электрическом отношении можно рассматривать как двухслойную среду, граница которой совпадает с движущимся фронтом фазового перехода. Поскольку период электромагнитных колебаний намного меньше времени, за которое глубина талого слоя d успевает заметно измениться, то при определении электромагнитного поля в массиве величину d можно считать постоянной. Это позволяет определить удельную мощность тепловых источников в среде $q = -div S$, воспользовавшись известным решением уравнений электродинамики в принятом одномерном приближении для плоскопараллельных сред. Опуская промежуточные преобразования, конечный результат можно представить в виде

$$q(z) = 2S_0 / h_м N(d) \exp(-2z/h_м), \quad d \le z \le \infty, \qquad (1)$$

где S_0 – плотность потока энергии, падающего на поверхность породы; $N(d)$ – коэффициент прохождения электромагнитной энергии в мерзлую породу, который учитывает отражение энергии от поверхности, затухание энергии в талом слое и является сложной функцией глубины талого слоя d, комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_м$ и $\varepsilon_т$, длины волны электромагнитных колебаний λ_0

$$N(0) = 2\sqrt{\varepsilon'_м} / (1 + \sqrt{\varepsilon'_м}), \quad N(d \to \infty) = 0,$$

h – глубина проникновения электромагнитного поля в породу, определяемая из условия $E(0)/E(h) = e$ (E – напряженность электрического поля),

$$h = \lambda_0 \sqrt{\varepsilon'} / \pi\varepsilon''. \qquad (2)$$

Поскольку характерное время СВЧ оттайки мерзлых пород составляет несколько минут, а влияние теплопроводности на образование талой зоны проявляется за час и более, то можно пренебречь теплопроводностью и получить уравнение движения фазового фронта при известной плотности тепловых источников $q(z)$, исходя из выполнения очевидного условия – энергия, погло-

щенная в данной точке z к моменту t подхода фазового фронта к этой точке, должна равняться энергии $Q = c_v |T_н| + q_\varphi$ (здесь c_v, $T_н$ и q_φ – соответственно объемная теплоемкость, начальная температура и скрытая энергия фазового перехода единицы объема мерзлой породы). Это приводит к следующему уравнению [2]:

$$\tau\left[\exp(2d/h_м) - 1\right] = \int_\tau^t N(d)\,dt, \qquad (3)$$

где τ – время образования талого состояния в поверхностном слое.
При $d \to 0$

$$\tau = Q h_м / S_0 N(0). \qquad (4)$$

Опуская промежуточные преобразования, приведем упрощенный вид искомой зависимости [3]:

$$d = 0{,}5 h_т \ln\left[1 + \beta(t/\tau - 1)\right], \qquad (5)$$

где $\beta = h_м / h_т = \varepsilon''_т \sqrt{\varepsilon'_м} / \varepsilon''_м \sqrt{\varepsilon'_т}$ – отношение глубин проникновения электромагнитного поля в мерзлую породу, зависящее только от электрических свойств породы в мерзлом и талом состояниях.

С помощью формулы (5) можно определить энергоемкость оттайки W как отношение энергии, введенной на единицу площади поверхности породы, к глубине оттайки:

$$W(t) = St / 0{,}5 h_т \ln\left[1 + \beta(t/\tau - 1)\right]. \qquad (6)$$

Исследование формулы (6) на экстремум показывает возможность СВЧ оттайки с минимальной энергоемкостью. Этому режиму при заданной S соответствует оптимальное время воздействия $t_{опт}$, которое определяется из условия $dW/dt = 0$, приводящего к уравнению

$$\ln\left[1 + \beta(t_{опт}/\tau - 1)\right] = \frac{\beta t_{опт}/\tau}{1 + \beta(t_{опт}/\tau - 1)}. \qquad (7)$$

Величина $d_{опт}$, на которую энергетически целесообразно вести оттайку, определяется по формуле (5), в которой $t = t_{опт}$.

Как следует из выражений (2), (4), (5), (6), описание процесса оттайки мерзлых пород под действием СВЧ электромагнитной энергии существенно упрощается введением двух основных параметров h и τ, которые служат соответственно пространственным и временным масштабом данного процесса. Именно через эти параметры проявляется влияние на процесс оттайки тепловых и электрических свойств мерзлых пород, зависящих в свою очередь от влажности w, плотности минерального скелета γ, гранулометрического и минерального состава, а также характеристик электромагнитного излучения S и λ_0. Разработанная модель нагрева была положена в основу экспериментов по оттайке мерзлых пород энергией электромагнитной волны.

Нагрев мерзлых пород исследовался на частоте 2375 МГц при плотности потока энергии S = 110,40 и 16 Вт/см^2. Энергия излучалась в образец из

открытого конца волновода сечением 9 х 4,5 $см^2$, примыкающего непосредственно к торцу образца, расположенному в холодильной камере, температура в которой устанавливалась -10 °С и -30 °С. В экспериментах использовались образцы размером 0,3 х 0,3 х 0,4 м. Для уменьшения отражения энергии от породы в излучатель встроен четвертьволновой диалектический трансформатор. Мощность, поступающая в образец, варьировалась с помощью диссипативного аттенюатора и контролировалась термисторными измерителями малых мощностей, включенными в плечи направленных ответвителей, ориентированных на падающую и отраженную волну.

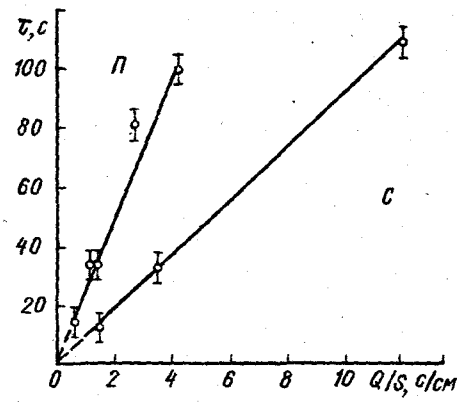


Рис.1. Влияние плотности потока электромагнитной энергии S частотой 2375 МГц и энергии фазового перехода Q на время образования талой зоны τ на поверхности породы

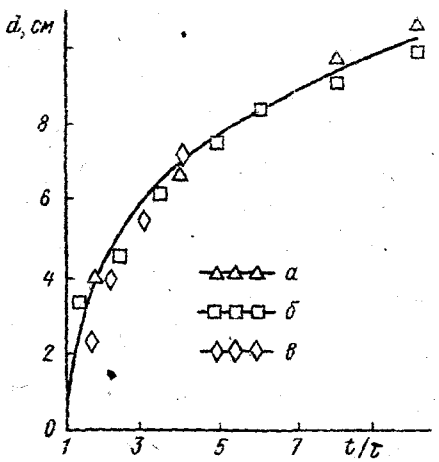


Рис.2. Зависимость глубины талой зоны d от нормированного относительно τ времени электромагнитного воздействия t частотой 2375 МГц при S = 110 Вт/$см^2$ (а); 40 (б) и 16 (в)

Начало образования талой зоны на поверхности породы определялось из временной зависимости температуры на поверхности образца $T(t)$ как момент, когда температура на поверхности достигала 0 °С. Глубина талого олоя измерялась вдоль оси волновода, где плотность потока энергии максимальна и равна $2P/\sigma$ (здесь P – мощность, излученная в породу; σ – площадь раскрыва излучателя).

Результаты экспериментов по определению зависимости времени образования талой зоны на поверхности породы τ от плотности потока энергии S, проведенных на образцах супеси ($С$) при w = 10 %, γ = = 1,55 г/$см^3$, $T_н$ = -30 °С и песка ($П$) при w = 5 %, γ = = 1,4 г/$см^3$, $T_н$ = -10°С и -30 °С представлены на рис.1. Из графиков следует, что полученные зависимости хорошо аппроксимируются линейной функцией с тангенсом угла наклона, равным $h_м$, как это и предсказывалось теоретической моделью нагрева.

Типичные экспериментальные зависимости $d(t)$, полученные на тех же блоках пород, представлены на рис.2. Как видно из рис.2, кривые $d(t/\tau)$ для разных S практически совпали, т.е. влияние S в этих переменных исключено. Это послужило основанием для аппроксимации экспериментальных зависимостей $d(t)$ теоретической кривой (5), параметры которой опреде-

лялись по методу наименьших квадратов с помощью решения на ЭВМ возникающей при этом системы нелинейных уравнений. Построенная по расчетным данным $h_м$ = 19,5 см, $h_т$ = 6,4 см зависимость $d(t/\tau)$ представлена на рис.2. Полученные результаты свидетельствуют, что предложенная выше модель нагрева мерзлых пород, несмотря на ряд упрощений, достаточно точно описывает процесс оттайки.

Для проведения исследований по СВЧ оттайке многолетнемерзлых пород естественного залегания использовались экспериментальные установки на частотах 2375 и 915 МГц, обеспечивающие плотность потока энергии в центре излучателей соответственно $4 \cdot 10^4$ и $23 \cdot 10^4$ Вт/м^2. В качестве излучателей в первом случае был применен пирамидальный рупор с площадью раскрыва 0,75 х 0,38 м^2, во втором – E-секториальный рупор размером 0,1 х 0,22 м^2. Исследовался процесс оттайки двух типов пород: на частоте 2375 МГц – мерзлой крупнообломочной породы (галька, сцементированная глиной, содержание заполнителя 50-60 %, температура –(5-6) °С, средняя влажность 9-10 %, плотность 1,9 т/м^3) и на частоте 915 МГц – мерзлого песка, характерного для деятельного слоя района г.Якутска (влажность 12-14 %, температура –(5-7) °С, плотность 1,6 т/м^3).

Эксперименты показали (рис.3), что наиболее интенсивно талая зона развивается в интервале времени от момента образования талого состояния на поверхности породы τ до $t = 4\text{-}5\tau$. За это время глубина оттайки достигает 0,28-0,32 м на частоте 915 МГц и 0,07-0,08 м на частоте 2375 МГц. При дальнейшем облучении породы рост талой зоны в ней замедляется, что связано с затуханием электромагнитной энергии в талом слое.

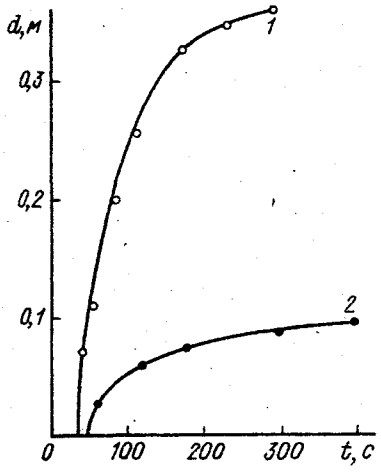


Рис.3. Динамика развития талой зоны в породах естественного залегания – песка на частоте 915 МГц (кривая 1) и крупнообломочной породы на частоте 2375 МГц (кривая 2)

Из графиков изменения объемной энергоемкости оттайки $W(t)$ в процессе нагрева (рис.4) видно, что зависимость $W(t)$ имеет минимум, на наличие которого указывалось при теоретическом рассмотрении процесса. Наличие этого минимума представляет практический интерес, поскольку свидетельствует о возможности ведения процесса оттайки с наибольшей объемной производительностью. При оттайке мерзлых песков, характерных для района Якутска, оптимальная глубина оттайки на частоте поля 915 МГц составляет 0,27-0,28 м. Эта глубина реализуется при $\mathcal{S}t_{опт} = (2{,}5\text{-}2{,}8) \cdot 10^4$ кДж/м^2. Энергоемкость оттайки при этом составляет 10^5 кДж/м^3 или 28 кВт·ч/м^3.

Заметим, что энергия фазового перехода единицы объема данного типа породы составляет $0{,}75 \cdot 10^5$ кДж/м^3. Очевидно, что

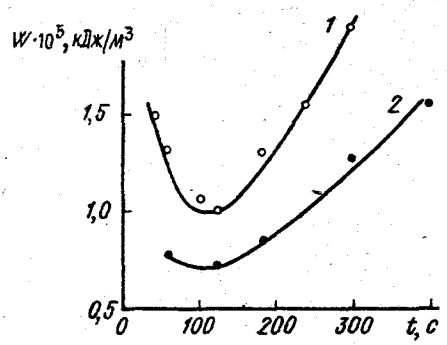


Рис.4. Объемная энергоемкость оттайки мерзлого песка на частоте 915 МГц (кривая 1) и крупнообломочной породы на частоте 2375 МГц (кривая 2)

энергозатраты на оттайку при любом виде теплового воздействия не могут быть меньше этой величины. Если характеризовать эффективность того или иного способа оттайки отношением минимальной энергоемкости, определяемой при равномерно распределенных тепловых источниках в нагреваемом объеме, к энергозатратам при данном способе нагрева, то в нашем случае коэффициент эффективности при оттаивании на глубину $d_{опт}$ составит 0,75.

Аналогичные параметры при оттайке крупнообломочных пород на частоте 2375 МГц равны: $d_{опт}$ = 0,06–0,07 м; $St_{опт}$ = (0,5–0,55)·10^4 кДж/м^2, W = = 0,7·10^5 кДж/м^3 = 20 кВт·ч/м^3.

Приведенные значения энергоемкости процесса определены, исходя из величины излученной в грунт электромагнитной энергии. Если учесть потери при преобразовании энергии промышленной частоты в энергию СВЧ колебаний, составляющие 30–40 %, то фактическая энергоемкость оттайки увеличивается в 1,4–1,7 раза.

Энергоемкость оттайки гравийно-галечных смесей ниже, чем у однородных тонкодисперсных пород. Причиной этого является меньшее объемное содержание влаги в крупнообломочных рыхлых породах, которая в основном и определяет энергоемкость оттайки. Поэтому наиболее перспективными следует считать применение СВЧ методов оттайки при разработке крупнообломочных пород.

Как видно из формул (2), (5) и данных эксперимента (рис.3), глубина оттайки мерзлых пород возрастает с уменьшением частоты электромагнитного поля, поэтому представляет интерес оценка характеристик оттайки мерзлых пород на частоте 430 МГц, наименьшей из разрешенных для промышленного применения частот СВЧ диапазона. Для этого воспользуемся данными эксперимента на частотах 2375 и 915 МГц d_1 и d_2 и определим значение d_3 на частоте 430 МГц. Учитывая, что электрические свойства пород в рассматриваемом диапазоне частот не обладают дисперсией, и требуя, чтобы t/τ на всех частотах было постоянной величиной, на основании формул (2), (4), (5) получим

$$d_m = d_n \frac{\lambda_m}{\lambda_n}, \qquad (8)$$

$$t_m = t_n \frac{\lambda_m}{\lambda_n} \frac{S_n}{S_m},$$

где индексы m, n = 1, 2, 3 относятся к длинам волн 12,6; 33 и 70 см, которые соответствуют частотам 2375; 915 и 430 МГц. Тогда ожидаемая глу-

бина оптимальной оттайки на частоте 430 МГц составит для мерзлых песков 0,55–0,6 м и для крупнообломочных пород 0,35–0,4 м. Предельные значения d_3 соответственно будут равны 0,6–0,7 м и 0,4–0,45 м. Оттайка мерзлых пород на большую глубину должна вестись послойно.

При переходе на большую длину волны электромагнитных колебаний для сохранения темпа нагрева плотность потока энергии должна быть увеличена в λ_m/λ_n раз. При этом, как следует из выражения (6), энергоемкость процесса сохраняется.

Полученные результаты могут служить основой для прогнозирования рациональных направлений применения СВЧ методов оттайки в различных технологических процессах разработки мерзлых дисперсных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мисник Ю.М. Основы разупрочнения мерзлых пород СВЧ-полями. Л., Недра, 1982.

2. Некрасов Л.Б., Рикенглаз Л.Э. Отражение энергии электромагнитного поля от полубесконечной диэлектрической среды при наличии в среде фазового перехода. – ЖТФ, 1972, вып. 7.

3. Рикенглаз Л.Э., Шонин О.Б. Упрощенный расчет нагрева мерзлых пород электромагнитным полем с учетом фазового перехода. – Известия вузов. Горный журнал, 1980, № 4.

4. Шонин О.Б., Соколова Н.В. Электрические свойства мерзлых пород в СВЧ-диапазоне. – Физические процессы горного производства. Межвуз. сборник, вып. 9. Л., изд. ЛГИ, 1981.