

УДК 538.569.4; 539.375.5

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ БЕТОНА МОЩНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

А. В. Аржанников, В. А. Быченков*, П. В. Калинин,
Г. В. Коваленко*, В. С. Койдан, Ю. Н. Лазарев*,
К. И. Меклер, П. В. Петров*, А. В. Петровцев*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, 630090 Новосибирск

* Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, 456770 Снежинск

Исследуется разрушение поверхностного слоя бетона мощным импульсом СВЧ-излучения. Найдены условия, необходимые для реализации сдвиговых и откольных разрушений в бетоне на заданной глубине. Определен диапазон электродинамических параметров, в пределах которого использование СВЧ-излучения для разрушения бетона наиболее эффективно. Сформулированы требования к СВЧ-генератору, позволяющие проводить экспериментальные исследования силового воздействия электромагнитного излучения на бетон.

Введение. В последние годы в различных областях науки и техники получили широкое распространение мощные СВЧ-генераторы сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. В настоящее время они успешно используются для радиочастотного нагрева плазмы в установках термоядерного синтеза с магнитным удержанием, диагностики плазмы, накачки газовых лазеров, создания низкотемпературной плазмы в различных технологических процессах. Ожидается, что в ближайшее время развитие СВЧ-техники обеспечит создание доплеровских радаров высокого разрешения, драйверов для нового поколения высокоградиентных ускорителей, решит проблемы дальней связи в космическом пространстве.

Рассматривается также возможность использования мощных импульсных потоков СВЧ-излучения для различных технологических целей. В частности, на наш взгляд, они перспективны при решении актуальной экологической проблемы атомной энергетики — очистки и “реабилитации” строений, загрязненных радиоактивными отходами. В основе такого метода очистки лежат два процесса: 1) отколы на свободной поверхности под действием ударной волны, генерируемой при локальном нагреве поверхностного слоя твердого тела мощным СВЧ-излучением; 2) хрупкое разрушение приповерхностного слоя при сдвиговой деформации из-за сильной анизотропности напряженного состояния. К несомненным достоинствам метода очистки с использованием мощных импульсных потоков СВЧ-излучения относятся дистанционное управление процессом, гарантирующее отсутствие прямого контакта персонала с радиоактивными загрязнениями, относительная безопасность используемого в технологии электромагнитного излучения и, наконец, возможность создания мобильной установки.

В связи с вышесказанным представляет интерес определение характерных параметров СВЧ-излучения, обеспечивающего разрушение поверхностного слоя бетона (строительного

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Международного научно-технического центра (грант № 531).

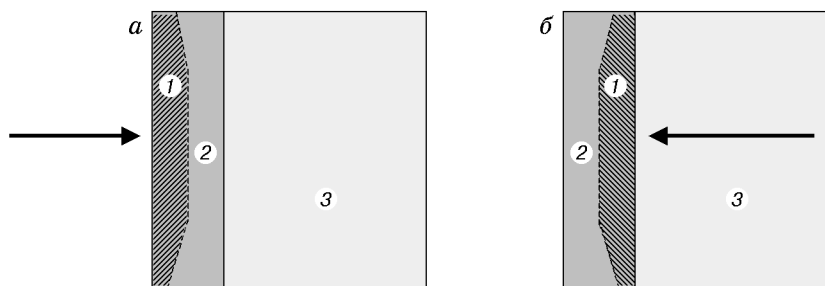


Рис. 1. Схемы облучения массива из бетона в экспериментах по разрушению его поверхностного слоя:

a — подача импульса извне, *б* — со стороны массива бетона; 1 — область разрушения, 2 — область с повышенной проводимостью, 3 — массив бетона; стрелкой показано направление потока СВЧ-излучения

материала, используемого на атомных станциях). Рассмотрению этой задачи посвящена данная работа. Основную ее часть составляет компьютерное моделирование процессов. Поскольку достоверных данных об электромагнитных свойствах бетона при воздействии на него излучений в СВЧ-диапазоне в литературе нам найти не удалось, была проведена серия экспериментов по измерению поглощения энергии миллиметровых волн в образцах из бетона различной толщины.

В Институте ядерной физики СО РАН на установке ЭЛМИ (электронная лента и миллиметровое излучение) уже достигнута энергия порядка 100 Дж в импульсах 4-миллиметрового излучения длительностью порядка микросекунд [1]. Как показано ниже, такой уровень достаточен для постановки экспериментов по разрушению поверхности бетона.

Аналитическая модель энергопоглощения. При определении условий разрушения плоского слоя бетона мощными потоками СВЧ-излучения первоочередной задачей, по-видимому, является создание в этом слое области с высокой плотностью поглощенной СВЧ-энергии, что необходимо для возникновения откола или сдвиговых разрушений поверхности. Для интенсивного поглощения энергии СВЧ-излучения такая область должна обладать повышенной проводимостью, что может достигаться, например, насыщением поверхности бетона солевыми растворами воды (количество воды, поглощаемой бетоном, может превышать 10 % его массы [2]).

Ниже рассматривается два варианта подачи импульсного СВЧ-излучения на толстый бетонный массив: 1) излучение падает на слой с повышенным поглощением электромагнитной энергии со стороны, где располагается поверхность, которую следует подвергнуть очистке (рис. 1, *a*); 2) излучение приходит на поглощающий слой со стороны, прилегающей к основному массиву бетона (рис. 1, *б*).

Оценим значения плотности электрических потерь электромагнитного поля при нормальном падении на плоскую границу раздела двух однородных сред плоской электромагнитной волны с амплитудой E_0 и частотой ω . Граница перпендикулярна оси z и пересекает ее в точке $z = 0$. Полупространство $z < 0$ заполнено средой, диэлектрическая проницаемость ε_0 которой имеет только действительную часть, проводимость среды пренебрежимо мала. В полупространстве $z > 0$ среда обладает комплексной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 + i\varepsilon''_1$, где $\varepsilon''_1 = 4\pi\sigma_1/\omega$; σ_1 — проводимость среды. Известно, что комплексный коэффициент θ прохождения электромагнитной волны из первой среды во вторую по электрическому полю определяется выражением

$$\theta = \frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon_1/\varepsilon_0}} = \frac{2}{1 + \sqrt{|\varepsilon_1|/\varepsilon_0} \exp(i\delta/2)}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1 = |\varepsilon_1| \exp(i\delta)$ ($\operatorname{tg} \delta = 4\pi\sigma_1/(\omega\varepsilon_1)$) — диэлектрическая проницаемость (см. [3]).

Распределение плотности мощности электрических потерь электромагнитной волны в проводящей среде ($z > 0$) может быть представлено в виде

$$W = \sigma_1 |E_1|^2 = \frac{4\sigma_1 \exp(-2kz\varepsilon'_1 \sin(\delta/2)/\sqrt{\cos \delta})}{1 + \varepsilon'_1/(\varepsilon_0 \cos \delta) + 2\sqrt{\varepsilon'_1 \cos(\delta/2)/(\varepsilon_0 \cos \delta)}} |E_0|^2$$

с максимальным значением

$$W_{\max} = \frac{\omega\varepsilon_0}{\pi} \frac{\beta^2 \operatorname{tg} \delta}{1 + \beta^2/\cos \delta + 2\beta \cos(\delta/2)/\cos \delta} |E_0|^2$$

($\beta = \sqrt{\varepsilon'_1/\varepsilon_0}$), реализующимся на границе раздела сред.

Значения диэлектрической проницаемости для составных частей бетонной смеси в широком диапазоне частот $10^2 \div 10^7$ Гц лежат в интервале $\varepsilon = 4 \div 15$ [4], причем для насыщенных влагой пород они больше, чем для сухих, поэтому можно считать $\beta > 1$. В случае $\beta \gg 1$ $W_{\max} \approx (\omega\varepsilon_0/\pi) |E_0|^2 \sin \delta$.

Учитывая, что амплитуда электромагнитной волны E_0 в среде с диэлектрической проницаемостью ε_0 связана с амплитудой поля на выходе генератора E_{in} соотношением, аналогичным (1): $\theta = 2/(1 + \sqrt{\varepsilon_0})$, получаем

$$W_{\max} \approx \frac{\omega}{\pi} \varepsilon_0 \sin \delta \frac{4}{(1 + \sqrt{\varepsilon_0})^2} |E_{in}|^2 \approx \frac{16\sigma_1}{\sqrt{(\varepsilon'_1)^2 + (4\pi\sigma/\omega_1)^2}} |E_{in}|^2 \sim W_{in} \frac{2\pi \sin \delta}{\lambda}, \quad (2)$$

где W_{in} — плотность потока СВЧ-излучения на выходе генератора; λ — длина волны электромагнитного излучения.

Из (2) следует, что для получения больших значений удельного энерговыделения и соответственно больших механических напряжений в разрушаемой области значения проводимости и диэлектрической проницаемости материала в ней должны удовлетворять условию $\sin \delta \rightarrow 1$.

Так как полные данные об удельной проводимости и диэлектрической проницаемости бетона отсутствуют (имеются только данные о проводимости горных пород, входящих в его состав [4]), были проведены измерения коэффициента поглощения электромагнитной энергии в бетоне различной толщины на длинах волн 4 и 8 мм.

Измерение поглощения в бетоне. Коэффициент поглощения электромагнитной волны в бетоне измерялся на установке, схема которой представлена на рис. 2. СВЧ-излучение с длиной волны 4 или 8 мм генерировалось клистроном и через систему волноводов, аттенюатор и рупоры выводилось в 3-сантиметровый волновод, где располагался облучаемый образец. Была определена зависимость ослабления электромагнитного излучения от толщины образца.

Экспериментальные зависимости коэффициента поглощения энергии η от толщины h образца бетона марки 200 представлены на рис. 3. Измерения проводились через две недели после изготовления образцов. Для электромагнитного излучения с длиной волны 4 мм глубина проникания электромагнитного поля составила примерно 10 мм при коэффициенте отражения около 10 %, с длиной волны 8 мм — около 20 мм при коэффициенте отражения немногим более 20 %. Аналогичные измерения проведены для двух основных составляющих бетона — песка и цемента (в сухом состоянии). Для обоих компонентов (практически независимо от длины волны) коэффициент отражения составил 20–25 %, а характерная глубина поглощения энергии — примерно 40 мм.

Оценки энергии, необходимой для разрушения бетона. Используя измеренную проводимость бетона, можно определить условия, при которых начинается его разрушение при воздействии СВЧ-излучения. Простейшие оценки показывают, что при воздействии импульсов излучения длительностью порядка микросекунд перераспределение

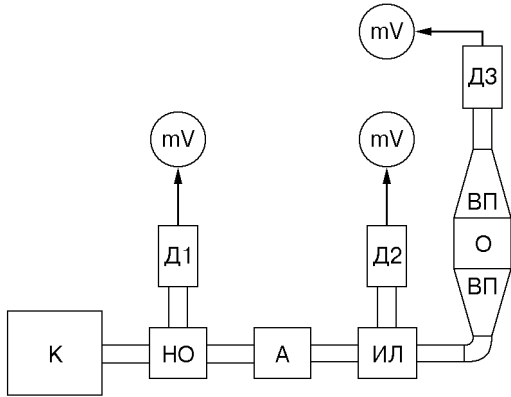


Рис. 2

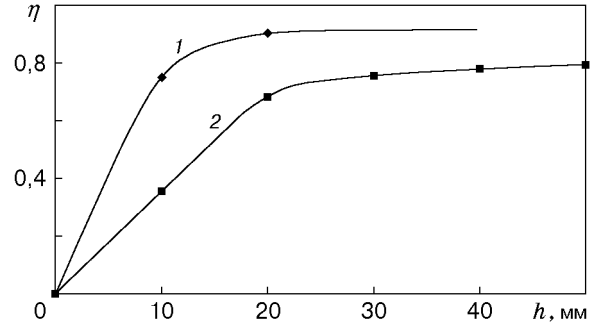


Рис. 3

Рис. 2. Схема стенда для измерения поглощения СВЧ-излучения в образцах из бетона различной толщины:

К — клистрон; НО — направленный ответвитель; А — аттенюатор; ИЛ — измерительная линия; ВП — волноводный переходник, обеспечивающий переход с 4 или 8 мм на 3 см; О — образец; Д1, Д2, Д3 — детекторы СВЧ-излучения; mV — милливольтметры

Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения энергии СВЧ-излучения от толщины бетонного образца:

1 — $\lambda = 4$ мм; 2 — $\lambda = 8$ мм

энергии за счет теплопроводности охватит лишь ближайšie к порам частицы цемента и, по-видимому, основной механизм ее перераспределения будет газодинамическим.

На первом этапе можно получить оценки удельной энергии в квазистатическом приближении, необходимой для появления сдвиговых разрушений в бетоне. В соответствии с [5] соотношения термоупругости имеют вид

$$\hat{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{9K} \delta_{ij} \hat{\sigma}_{ll} + \frac{1}{2\mu} \left(\hat{\sigma}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \hat{\sigma}_{ll} \right) + \frac{1}{3} \alpha (T - T_0) \delta_{ij}.$$

Здесь $\hat{\sigma}_{ij}$ и $\hat{\epsilon}_{ij}$ — соответственно тензоры напряжений и деформаций; δ_{ij} — символ Кронекера; K и μ — соответственно модули объемного сжатия и сдвига; α — объемный коэффициент теплового расширения; T — температура; T_0 — начальная температура; $\hat{\sigma}_{ll}$ — сумма диагональных элементов тензора напряжений. Для условий одноосного сжатия-растяжения в главных осях, одна из которых (с индексом 1) перпендикулярна поверхности бетона, тензоры имеют диагональный вид и $\hat{\epsilon}_{22} = \hat{\epsilon}_{33} = 0$. Кроме того, $\hat{\sigma}_{11} = 0$. Поэтому, используя связь между упругими модулями, где $K/\mu = 2(1 + \nu)/(3(1 - 2\nu))$ (ν — коэффициент Пуассона), получим

$$\hat{\epsilon}_{22} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{1}{2K} \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \hat{\sigma}_{ll} + \alpha (T - T_0) \right\} = 0. \quad (3)$$

Полагаем, что разрушение бетона происходит при достижении предельного уровня сдвиговых напряжений в соответствии с условием Мизеса $J = \sqrt{1,5 \sum_{i=1,2,3} (\hat{\sigma}_{ii} + P)^2} \leq Y$,

где $P = -\hat{\sigma}_{ll}/3$ — давление.

С учетом того, что $J = 3/(2|\hat{\sigma}_{11} + P|) = |\hat{\sigma}_{ll}|/2$, для оценки предельного значения плотности внутренней энергии из (3) получим

$$w_q = C(T - T_0) = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \frac{CY}{K\alpha}$$

(C — удельная теплоемкость). Например, при $K = 13$ ГПа, $\nu = 0,2$, $C = 0,84 \times 10^{-3}$ кДж/(г·К), $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}$ К $^{-1}$ [6], $Y = 0,02$ ГПа (бетон марки 200) получим $w_q = 43$ Дж/г.

Таким образом, при медленном разогреве бетон разрушится при получении энергии свыше 43 Дж/г из-за сильной асимметрии напряженного состояния, а именно вследствие невозможности расширения вдоль направлений, параллельных поверхности бетона.

Выделение энергии в проводящей области приведет к повышению температуры бетона и солевого раствора примерно на 10 К ($C_{H_2O} = 4,2 \cdot 10^{-3}$ кДж/(г·К)) и увеличению проводимости на 20–25 %. Поскольку сама проводимость определяется с наименьшей погрешностью (20–25 %), то изменение температуры вследствие поглощения можно не учитывать.

Компьютерное моделирование разрушения. При быстром выделении энергии бетон может быть разрушен при возникновении растяжения (откольное разрушение). Возможность реализации этого процесса проанализирована с использованием одномерного программного комплекса “Волна-РС”, основные алгоритмы которого описаны в [7]. При этом моделирование упругопластических свойств веществ и разрушения материала проводилось в соответствии с подходом, изложенным в [8].

Для определения оптимальных условий разрушения бетона проведены расчеты для различных вариантов выделения энергии. Рассматривался плоский слой бетона, левая граница которого считалась свободной (краевое условие $P = 0$). Правая граница считалась жесткой стенкой. Кроме того, толщина слоя выбиралась достаточной, чтобы наличием правой границы можно было пренебречь.

Для описания выделения энергии использовалась зависимость

$$\frac{dW}{dt} = W_0 f(z) \varphi(t),$$

где

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq t_u, \\ 0, & t > t_u; \end{cases} \quad f(z) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{z-d}{L}\right), & z \geq d, \\ 0, & z < d; \end{cases}$$

$L = 1,2$ см — характерная длина спада, что соответствует экспериментальным данным, полученным при 4-миллиметровом излучении; d — глубина бетона, начиная с которой происходит выделение энергии. В расчетах варьировались длительность выделения энергии t_u , величины d и W_0 .

Уравнение состояния бетона задавалось в виде $P = c_{0,k}^2 (\rho - \rho_{0,k}) + (\gamma - 1) \rho W$, где $c_{0,k} = 2,4$, $\gamma = 1,3$. Начальная плотность бетона совпадала с “кристаллической” плотностью и составляла $\rho_{0,k} = 2,25$ г/см 3 .

Динамические значения прочностных характеристик сплошного бетона считались совпадающими с их статическими значениями, указанными выше. Принималось, что сдвиговая прочность Y постоянна и равна $Y = 0,02$ ГПа, а критическая прочность на растяжение (откольная прочность) $\sigma_{кр} = -0,003$ ГПа [6].

При разрушении на сдвиг прочность бетона резко уменьшалась. При этом сдвиговая прочность задавалась в зависимости от давления:

$$Y = Y_0 + \beta P \frac{A - Y_0}{A - Y_0 + \beta P},$$

где $Y_0 = 0$; $A = 0,002$ ГПа; $\beta = 1$. В отсутствие давления значение Y уменьшалось до нуля, а при его увеличении восстанавливалось до значения, равного 0,1 предела прочности сплошного бетона. Считалось, что бетон не может сопротивляться растяжению ($\sigma_{кр} = 0$). Разрушенный при растяжении бетон не обладал прочностью ни на сдвиг, ни на растяжение.

Параметр энерговыделения					Глубина залегания зоны разрушения, см	
d , см	t_u , мкс	L , см	Q_0 , Дж/см ²	W_{\max} , Дж/г	на сжатие	на растяжение
0	0,1	1,2	22,1	8,2	—	—
0	0,1	1,2	23,0	8,5	—	1,95
0	1	1,2	25,4	9,4	—	—
0	1	1,2	31,7	11,7	—	1,31
0	1	1,2	127,0	47,0	0 ÷ 0,26	2,01
2	1	1,2	25,4	9,4	—	—
2	1	1,2	31,7	11,7	—	1,55 ÷ 1,56
2	1	1,2	127,0	47,0	2,0 ÷ 2,23	0,17 ÷ 0,57
0	10	1,2	63,4	23,5	—	—
0	10	1,2	79,2	29,3	—	2,2
2	10	1,2	127,0	47,0	2,0 ÷ 2,38	0,7 ÷ 2,0
0	100	1,2	79,2	29,3	—	—
0	100	1,2	119,0	44,0	0 ÷ 0,12	—
0	100	1,2	793,0	294,0	0 ÷ 2,6	5
0	1000	1,2	317,0	117,0	0 ÷ 1,3	—

Примечание. Q_0 — удельная энергия, выделившаяся в бетоне, W_{\max} — максимальное значение удельного выделения энергии в бетоне. Прочерк означает отсутствие разрушения.

Результаты серии выполненных расчетов, показывающие состояние бетона после импульсного воздействия СВЧ-излучения, приведены в таблице. Кроме того, на рис. 4 представлены результаты численных расчетов в виде профилей напряжения $\hat{\sigma}_{11}(z)$ для различных моментов времени t , иллюстрирующие распространение волн в массиве бетона и его разрушение.

Из таблицы следует, что минимальное значение Q_0 , при котором начинаются откольные разрушения для рассматриваемого типа бетона, при времени воздействия $t_u = 0,1 \div 1,0$ мкс составляет $Q_{01} = 25 \div 30$ Дж/см² ($W_{\max} \approx 10$ Дж/г).

С увеличением длительности импульса воздействия минимальное значение энергии, падающей на единицу площади слоя, которая необходима для создания отколов, возрастает до $Q_{01} \approx 80$ Дж/см² при $t_u = 10$ мкс. При $t_u = 100$ мкс эта величина становится больше значения $Q_{02} \approx 130$ Дж/см², которое соответствует границе сдвиговых разрушений. При дальнейшем увеличении длительности импульса откольных разрушений сплошного бетона, по-видимому, не должно возникать.

Критические значения удельной энергии, необходимой для создания сдвиговых разрушений, одинаковы для всех значений t_u и равны $Q_{02} \approx 130$ Дж/см². При этом максимум поглощенной энергии на единицу массы бетона равен $W_{\max} \approx 47$ Дж/г, что хорошо согласуется со сделанными выше оценками в квазистатическом приближении.

Область сдвиговых разрушений бетона дополняется с внешней стороны областью откольных разрушений. При увеличении Q_0 количество разрушенного на сдвиге вещества возрастает, и при $Q_0 \approx 270$ Дж/см² зона сдвиговых разрушений распространяется на расстояние около 5 см от границы области выделения энергии.

При переносе области выделения энергии в глубь бетонного массива критические значения энерговыделения Q_{01} и Q_{02} сохраняются, так как важным является лишь уровень напряжений, а затухание волн мало. При этом область разрушения увеличивается, так как происходит также разрушение вблизи поверхности бетона вне зоны выделения энергии.

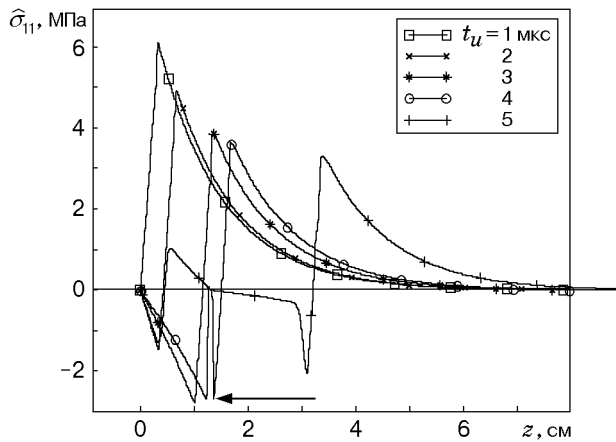


Рис. 4

Рис. 4. Профили напряжения в различные моменты времени ($Q_0 = 31,7$ Дж/см², $t_u = 1$ мкс); стрелкой обозначена точка разрушения

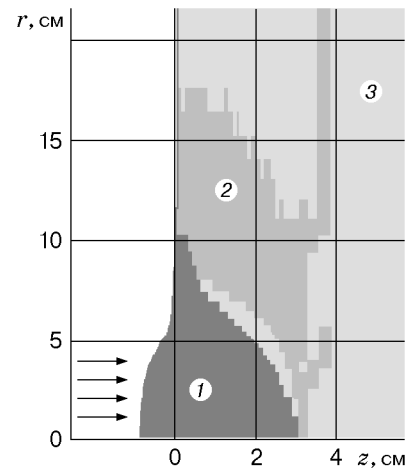


Рис. 5

Рис. 5. Зоны разрушения бетона после облучения его поверхности гауссовым пучком 4-миллиметрового излучения радиусом $r_b = 5$ см ($Q_0 = 120$ Дж/см², $t_u = 100$ мкс):

1 — зона сдвиговых разрушений; 2 — зона откольных разрушений; 3 — массив бетона; стрелками показано направление потока СВЧ-излучения

Большой интерес представляют значительные длительности импульса. В этом случае целесообразно рассматривать двумерную картину изменения напряженных состояний участков бетона из-за возможной разгрузки в направлениях, параллельных свободной поверхности. Расчеты динамики разрушения бетона, облучаемого гауссовым пучком СВЧ-излучения с шириной на половине высоты, равной 5 см, по двумерной программе СПРУТ [8], представлены на рис. 5. Вычисления подтверждают основные результаты одномерного моделирования и эффективность применения СВЧ-облучения для разрушения бетонной поверхности.

Следует отметить, что из-за отсутствия сведений о прочности бетона в динамических процессах в расчетах как для больших, так и для малых ($t_u \leq 1$ мкс) длительностей импульса использованы значения прочности, относящиеся к статическим условиям нагружения. В реальных условиях в силу того, что при высоких скоростях деформации бетона предел прочности этого материала повышается, значения Q_{01} и Q_{02} могут измениться (увеличиться). При этом возможные ошибки возрастают с уменьшением длительности импульса.

Заключение. Требования к источникам СВЧ. Расчеты показывают, что разрушение поверхности бетона при облучении мощным СВЧ-излучением может происходить как за счет деформаций сдвига, так и за счет деформаций растяжения. Для разрушения вследствие растяжения удельное выделение энергии при импульсном воздействии СВЧ-излучения должно быть равным 10, 30 и 300 Дж/г при $t_u \approx 1, 10, 100$ мкс соответственно. Удельное выделение энергии электромагнитного излучения, необходимое для разрушения бетона путем сдвига, должно составлять примерно 50 Дж/г. Эта величина слабо зависит от длительности импульса, геометрии облучения и формы области энерговыведения. Граница области разрушения определяется границей проводящего слоя и геометрией облучения и может регулироваться в соответствии с техническими требованиями.

На основе полученных данных можно сформулировать некоторые требования к СВЧ-генераторам применительно к экспериментам по разрушению бетонных поверхностей.

Оценка необходимой мощности СВЧ-излучения для сдвигового разрушения может быть получена из формулы (2), где удельная поглощенная энергия будет определяться квазистатическим пределом w_q :

$$\frac{w_q}{t_u} = W_{in} \frac{2\pi \sin \delta}{\rho \lambda}.$$

Следовательно, плотность потока мощности, поступающей от генератора, должна быть порядка $W_{in} \approx \rho \lambda / (2\pi \sin \delta) (w_q / t_u) \approx 100 \lambda / (2\pi t_u)$ [Вт/см²]. При этом на разрушаемой поверхности необходима энергия на единицу площади порядка $100 \lambda / (2\pi)$ [Дж/см²]. Для современных мобильных СВЧ-генераторов это вполне достижимые величины.

Разрушение ударной волной с образованием отколов требует существенно меньших затрат энергии, но значительно более мощных устройств. Так, при длительности импульса излучения $1 \div 10$ мкс энергия должна быть порядка килоджоулей, а мощность — порядка нескольких гигаватт.

Энергия СВЧ-излучения, достаточная для проведения экспериментов по разрушению бетона при кратковременном воздействии, может быть достигнута при использовании ленточного электронного пучка с энергией 0,4 МДж, который уже получен на ускорителе У-2 [9].

Авторы выражают благодарность Г. Кесслеру и Ж. Эйблю (г. Карлсруэ, Германия) за поддержку работы и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Agafonov M. A., Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., et al.** Generation of hundred joules pulses at 4-mm wavelength by FEM with sheet electron beam // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26, N 3. P. 531–535.
2. **Garboczi E. J., Bentz D. P.** Multi-scale picture of concrete and its transport properties: Introduction for non-cement researches. Levermore (USA): Nat. Inst. of Standards and Technol. Intern., 1996. Report 5900.
3. **Ванштейн Л. А.** Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.
4. **Физические свойства горных пород и полезных ископаемых:** Справ. геофизика / Под ред. И. Б. Дорман. М.: Недра, 1984.
5. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теория упругости. М.: Наука, 1987. Т. 7.
6. **Таблицы физических величин:** Справ. / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
7. **Куропатенко В. Ф., Коваленко Г. В., Кузнецова В. И. и др.** Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод расчета движений сжимаемых сред // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Методики и программы числ. решения задач мат. физики. 1989. Вып. 2. С. 9–25.
8. **Быченков В. А., Гаджиева В. В., Куропатенко В. Ф.** Расчет неустановившихся движений сжимаемых сред // Числ. методы механики сплошной среды. 1972. Т. 3, № 2. С. 3–17.
9. **Agafonov M. A., Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., et al.** Super power generator of mm-waves driven by microsecond sheet beam // Digest of techn. papers. 11th Intern. pulsed power conf., Baltimore, Maryland, USA, June 29 — July 2, 1997. Baltimore, 1997. P. 121–126.

Поступила в редакцию 26/IV 1999 г.