

П.П. Малюшевский, В.И. Купный, А.В. Иванов, В.В. Иванов, С.М. Тихоненко, А.Я. Горелик,
А.Д. Кравченко, Е.П. Афиногенов, А.Ф. Атрошенко

РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТОПЛИВО-СОДЕРЖАЩИХ МАСС ИЗ ОБЪЕКТА “УКРЫТИЕ”. ЧАСТЬ I (Концепция)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина,
Объект “Укрытие Чернобыльская атомная электростанция,
г. Славутич Киевской обл., 255190, Украина*

Как известно [1, 2], извлечение топливосодержащих материалов (ТСМ), их изоляция и дальнейшее захоронение составляют основную часть перевода объекта “Укрытие” в экологически безопасное состояние. Реализация этой основной задачи в силу необычных условий производства работ на объекте “Укрытие” должна в первую очередь базироваться на разработке и создании дистанционных технологий для всего комплекса работ, то есть аппаратурной реализацией этих технологий должны стать различного рода робототехнические комплексы. Для последних наиважнейшим является отработанный “инструмент воздействия” на ТСМ – тот или иной физический или химический способы разделения, разрушения, измельчения, растворения, поддающиеся дистанционному управлению. К их числу относится и подводный электрический взрыв (ПЭВ), который может занять свою нишу в разрабатываемом комплексе технологий.

Топливосодержащие материалы в объекте “Укрытие” находятся в различном виде (графитовые обломки, радиоактивные лавы, пемзы, покрывные бетоны, вновь образованные в условиях жесткой радиации минералы) и в различных помещениях (от уровня “0” до самых верхних строительных элементов, от свободно лежащей “кучи” натекшего пластифицированного бетона в помещении барботера до хаотического многослойного нагромождения всех их видов в подреакторных помещениях или заброшенных на выступы опор перекрытия). Все ТСМ постепенно и непрерывно изменяют свои физико-механические и физико-химические свойства так, что в каждый момент времени они не известны для оперативного учета при планировании действий над ними.

Таким образом, создаваемый инструмент воздействия на ТСМ должен быть в состоянии изменять характер и параметры своего воздействия в самых широких пределах и они должны быть ему доступны в любом пространственном положении и в любом помещении.

Для анализа процессов деформирования и разрушения ТСМ в помещениях объекта “Укрытие” был выбран пластифицированный бетон как материал наиболее трудно разрушаемый. Выполнялся теоретический анализ и экспериментальные исследования процессов трещинообразования и разрушения выбранного материала.

Исследование процессов деформирования бетона при динамических нагрузках

Описание разрушения среды при импульсном ее нагружении или под действием рабочего органа машины предполагает решение и исследование сложной в математическом и физическом смысле проблемы. Здесь приходится иметь дело с изучением объемного напряженно-деформируемого состояния среды. Появление новых поверхностей разрушения вносит в процесс решения задачи дополнительные трудности, задача становится нелинейной, так как на этих, заранее неизвестных поверхностях, необходимо ставить новые граничные условия и осуществлять проверку выполнения критерия прочности. Построение решения все время усложняется необходимостью учета вторичных возмущений.

Задачу можно было бы считать полностью изученной при выполнении следующих шагов:

– решения соответствующих динамических задач по распространению возмущений с учетом реальных свойств среды;

- выбора критериев прочности конкретного материала;
- анализа полученного на первом этапе состояния еще не разрушенного тела и описания на этой базе возможного механизма разрушения;
- учета взаимодействия трещин с вторичными полями, ими же порожденными;
- уточнения решения и механизма разрушения [4].

Примеров полной реализации такого плана еще нет.

Рассмотрим некоторые подходы к решению задачи разрушения, основанные на упрощенных предположениях.

Анализ основных концепций разрушения твердых тел

Будем считать, что твердое тело изотропно и однородно. Это позволит использовать аппарат математической теории упругости и пластичности. Сделанное предположение справедливо тогда, когда характерный размер воздействия, длина волны, много больше или, наоборот, много меньше характерных включений и естественных трещин. В частности, для горной массы более правильно считать определяющими такие свойства, как трещиноватость, слоистость, блочность. Предположим, что в объекте “Укрытие” состояние среды такое же.

В качестве модели среды обычно берется упругая или упруго-пластическая модель. В первом случае критерий прочности хрупкого тела (то есть упругого в математическом смысле вплоть до разрушения) формулируется в виде ограничения на коэффициент интенсивности напряжений k_I в вершине трещины. Если величина k_I превышает критическое k_I^* , то считается, что возникает неустойчивое состояние и трещина начинает увеличиваться в размерах. При этом следует учесть, что в ближайшей окрестности разрушения можно обнаружить сильное течение материала (деформации до сотен процентов) и эту зону надо заменить зоной равномерно деформированного материала [4]. Из оценок следует, что при достаточно мощных взрывах размазываемая пластическая зона пренебрежимо мала по сравнению с разрушаемой и поведение любого упругопластичного тела приближается к идеально-хрупкому.

Наличие в реальных средах пористости, зерен, вязкости и т.д. приводит к тому, что затухание массовой скорости и напряжений намного выше, чем в упругопластическом материале. Так, в случае сферической волны по данным [5] и находится в пределах от 1 до 3, а в [6] приводится таблица показателей затухания радиальной компоненты максимальной массовой скорости, полученных при регистрации мелкомасштабных взрывов в 15 геологических средах. Из таблицы следует (в подтверждение теоретических результатов), что с уменьшением мощности взрывов или с увеличением расстояния от него показатель затухания падает. В [7] приведены аналогичные результаты для песка и проведено сравнение с данными других авторов. Этот фактор необходимо учитывать при построении численной модели явления.

В настоящее время для объяснения механизма разрушения все большее распространение получает концепция накопления повреждений. Данная концепция по существу кинетическая и кладет в основу изменение структуры материала в течение активного действия на него нагрузки динамического характера.

Критерий мгновенного откола дает удовлетворительные результаты только для опытов, в которых импульс весьма короткий и мощный. При увеличении длительности и уменьшении его амплитуды происходит значительное отклонение расчетных от экспериментально наблюдаемых величин. Происходит и изменение характера разрушения: вместо гладкой откольной поверхности вблизи магистральной трещины имеется зона рыхлого материала, насыщенного микротрещинами. Необъяснимым с точки зрения “мгновенного” критерия кажется увеличение предела прочности на растяжение при изменении условий нагружения, разрушение материала не на первом отражении от свободной поверхности или при падающей нагрузке [4]. Таким образом, время может являться существенным фактором разрушения, так как естественно считать, что для разрушения элемента среды недостаточно создать в нем некоторое критическое напряжение σ_0 , но и необходимо зафиксировать его на определенный отрезок времени, тем меньший, чем больше полученный уровень напряжения. То есть имеет место некоторая функция [9]:

$$\tau = A_1 \cdot t^{-\beta\sigma_0}, \quad \tau = A_2 / \sigma_0^n.$$

В обоих случаях момент разрушения системы, нагружаемой по известному закону $\sigma = \sigma(t)$, будет определяться выполнением условия

$$\Phi(\tau_p) = \int_0^{\tau_p} \frac{dt}{\tau(\sigma(t))} = 1,$$

то есть моментом равенства интеграла накопляемости повреждений Бейли единице. Отметим, что при $n = 1$ в исследуемой точке происходит суммирование импульса растягивающих напряжений. Строго говоря, надо принимать во внимание влияние промежуточного сжатия, то есть учитывать частичное или даже полное “залечивание” дефектов. Однако для этого нужно точное соприкосновение берегов трещины и создание напряжений сжатия значительно большего порядка, чем разрушающие напряжения.

При наличии экспериментальных или априорных данных об истории нагружения функция $\Phi(\tau)$ может иметь и другой вид.

Возможен и второй подход, учитывающий конечность времени разрушения, изложенный, например, в [10]. Многочисленные фрактографические исследования металлов, многослойных композитов, скальных пород, полимеров позволяют сделать вывод, что процесс динамического разрушения имеет универсальный характер и может быть расчленен на четыре стадии, протекающие в течение нескольких микросекунд: зарождение микродефектов, рост этих и уже имеющихся центров разрушения под действием растягивающих напряжений, слияние соседних микродефектов, расслоение и разделение материала с образованием свободных поверхностей в сплошной среде.

В зависимости от формы и величины импульса процесс динамического разрушения может прерваться на некоторой стадии.

Очевидно, что появление значительного числа микродефектов может существенно изменить механические свойства материала. В некоторых работах, например в [11], приводятся способы учета этого факта.

Расчеты как по этой модели, так и по модели, связанной с интегралом поврежденности, дают возможность строгого решения задачи по образованию первого откола. Другими словами, под разрушением тела понимается расчленение его на две части. Формально можно продолжать решение задачи и дальше, но при этом не будет в полной мере учитываться обратное влияние разрушения на поле напряжения.

Первая из рассмотренных моделей является промежуточной между моделями мгновенного откола и второй кинетической, подробно учитывающей процесс накопления и развития микротрещин. Но для адекватности конкретному материалу требуется большее число экспериментальных данных, связанных с масштабными явлениями [13].

В условиях объемного динамического состояния с течением времени в каждой точке меняются не только величины главных напряжений, но и их ориентация. Поэтому для решения вопроса о разрушении среды следует анализировать напряженное состояние в каждой точке по всем площадкам, то есть критерий разрушения должен носить “тензорный” характер. Тем не менее, в настоящее время общеупотребительными являются одномерные критериальные представления.

В соответствии с этим в теоретических и в экспериментальных исследованиях наибольшее внимание уделяется одномерным задачам. Их численное моделирование дает возможность более подробно проанализировать волновую картину в телах – установить степень адекватности и границы применимости определяющих соотношений. При программной реализации таких моделей нет необходимости решать сложные краевые задачи. Вследствие этого сокращаются до минимума погрешности, вносимые в результат самой численной схемой решения задачи.

Механические характеристики пластифицированного бетона в условиях одноосного нагружения

Бетон представляет собой материал, состоящий из цементного камня, включающего кристаллический сросток, гель и большое количество пор и капилляров, содержащих пары и жидкость, в котором хаотично расположены зерна крупного и мелкого заполнителя. В таком неоднородном материале нагрузка создает сложное напряженное состояние, а диаграмма деформаций σ - ε , полученная в результате испытаний бетонных образцов, является нелинейной, содержащей в общем случае криволинейные восходящий и нисходящий участки. Однако, несмотря на то, что такие диаграммы зависят от многих факторов (вида бетона, его состава, соотношения свойств компонент, степени сцепления между цементным раствором и крупным заполнителем, их деформативных характеристик, скорости нагружения) общий характер их сохраняется. Опыты по построению таких полных диаграмм могут быть получены лишь с помощью обширного комплекса лабораторного оборудования, основу которого составляют специальные, жесткие прессы.

Влияние высоких скоростей деформаций при нагружении бетона электровзрывом на его прочностные свойства проявляются в изменении диаграммы деформаций и в повышении прочности бетона. При увеличении скорости диаграмма деформаций несколько изменяется, приближаясь на возрастающем участке к прямой линии. Увеличение предела прочности бетона обусловлено главным образом изменениями в характере его трещинообразования. Для разрушения, то есть образования сплошных трещин отрыва, требуется достаточное развитие процесса микротрещинообразования и достижение определенной предельной деформации. Чем короче время нагружения, тем большие напряжения необходимо приложить, чтобы образовались трещины отрыва. Деформативность бетона зависит от скорости деформирования в значительно меньшей степени. В зависимости от прочности бетона его предельная сжимаемость ε и σ имеют величину $(0,8-3) \cdot 10^{-3}$, а предельная растяжимость ε и σ_t имеют величину $(0,01-2) \cdot 10^{-3}$.

Динамическая прочность одного и того же вида бетона зависит от текущего содержания в нем влаги, способа его приготовления (твердения в условиях жаркого климата или твердения в нормальных температурно-влажностных условиях), предшествующей статической нагрузки и т.д., причем их влияние неоднозначно. Даже приближенный учет всех факторов в реальных расчетах крайне затруднителен. Поэтому в данной работе были использованы подходы [7, 9, 14], где на базе экспериментальных данных по кратковременному динамическому нагружению бетона прочностью до 140 МПа была построена полная $\sigma_\varepsilon - \varepsilon_\varepsilon$ диаграмма.

При обработке результатов экспериментов [15] предполагалось, что эффекты, связанные с влиянием на прочность и деформативность бетона скорости деформирования, с достаточной точностью могут быть описаны соотношением вида [9, 15]

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \sigma/E + g(\sigma - f(\varepsilon)), \quad E = E(\varepsilon), \quad \sigma \geq f(\varepsilon), \\ E &= E(\varepsilon_*), \quad \sigma < f(\varepsilon), \end{aligned} \quad (1)$$

$g(z) > 0$ при $z = \sigma - f(\varepsilon) > 0$ и $g(z) \equiv 0$ при $z \leq 0$; $f(\varepsilon)$ – статическая диаграмма одноосного сжатия бетона, $E(\varepsilon)$ – некоторая функция, характеризующая сжимаемость бетона при мгновенном нагружении ($\varepsilon' = \infty$); ε_* – максимальная деформация, достигнутая при нагружении, определяемая условием $\sigma = f(\varepsilon)$; σ, ε – соответственно напряжения и продольная относительная деформация образца.

Как показано в [16], для сред с уравнением состояния типа (1) имеет место следующее соотношение, устанавливающее взаимосвязь скоростей распространения малых возмущений $c(\varepsilon)$ в среде с предельной динамической диаграммой $\varphi(\varepsilon)$, соответствующей мгновенному нагружению

$$E(\varepsilon) = d\varphi(\varepsilon)/d\varepsilon = \rho_0 c^2(\varepsilon), \quad (2)$$

где ρ_0 – начальная плотность среды.

Из (2), интегрируя по ε , получим предельную динамическую диаграмму

$$\varphi(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon \varphi(\xi) d\xi, \quad \varepsilon' = \infty.$$

При статических нагрузках ($\varepsilon', \sigma' \rightarrow 0$) из (1) получается статическая диаграмма сжатия.

Механическими характеристиками материала, которые в рамках модели (1) подлежали экспериментальному определению, являлись функции $E(\varepsilon)$, $\varphi(\varepsilon)$, $f(\varepsilon)$, $g(\sigma - f(\varepsilon))$.

Результаты статистической обработки данных по статическому деформированию с достаточной точностью могут быть аппроксимированы зависимостями

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} R_c \left[1 - (1 - \varepsilon / \varepsilon_R)^n \right], & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_R \\ R_c \left[\varepsilon / \varepsilon_R \cdot e^{(1 - \varepsilon / \varepsilon_R)^\alpha} \right], & \varepsilon \geq \varepsilon_R, \end{cases} \quad (3)$$

где R_c – среднее по результатам серии испытаний значение прочности в МПа; ε_R – величина продольной деформации при максимальных напряжениях в образце; n, α – экспериментальные коэффициенты.

Значения ε_R, n, α определяются в зависимости от прочности из соотношений:

$$\varepsilon_R = (198 + 0,54R_c) \cdot 10^{-5}, \quad n = 9,31R_c^{-0,43}, \quad \alpha = 9,11 \cdot 10^{-3} R_c^{1,69}. \quad (4)$$

Зависимости $E(\varepsilon)$ могут быть взяты в виде

$$E(\varepsilon) = \begin{cases} K_E \cdot 1,08E_0 \left[1 - 0,074(1 - \varepsilon/\varepsilon_E)^2 \right], & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_E \\ K_E \cdot 1,08E_0 \left[1 - m(\varepsilon/\varepsilon_E - 1)^{1,5} \right], & \varepsilon \geq \varepsilon_E, \end{cases} \quad (5)$$

где $E_0 = \rho_0 c_0^2$ (c_0 – начальная скорость звука в образце), m – экспериментальный коэффициент, связанный с R_c формулами $E_0 = 2,72 \cdot 10^4 + 373R_c$; $m = 1,79 \cdot 10^{-3} R_c$, а K_E показывает эмпирическую зависимость начального модуля деформации от вычисленной скорости деформации ε'_0 при сжатии $K_E = 1,205 + 0,082 \cdot \lg|\varepsilon'_0| + 0,082 \cdot \lg^2|\varepsilon'_0|$, а также при растяжении $K_E = 1,205 + 1,7 \cdot \lg \varepsilon'_0 + 0,3 \cdot \lg^2 \varepsilon'_0$, а ε_E определяется как $\varepsilon_E = 0,616 \cdot (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} R_c) \cdot \varepsilon_R$. Деформации ε_E и ε_R соответствуют началу трещинообразования и разрушения образца.

Функция $g(\sigma - f(\varepsilon))$ принимается в следующем виде $g = [\eta(\sigma - f(\varepsilon))/f(\varepsilon)]^2$ (здесь η характеризует вязкие свойства бетона, а введение отношения $(\sigma - f(\varepsilon))/f(\varepsilon)$ основано на предположении, что скорость приращения пластической деформации пропорциональна превышению текущего значения σ над статическим при той же деформации).

Проведенные авторами [15, 17, 18] исследования и обработка опубликованных в литературе экспериментальных данных показали, что зависимость η может быть представлена в виде

$$\eta = \begin{cases} \eta_0(R_c), & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_R \\ \eta_0(R_c) \cdot e^{\beta(1-\varepsilon/\varepsilon_R)}, & \varepsilon > \varepsilon_R \end{cases} \quad (6)$$

$$\eta_0 = 2,31 \cdot R_c^{0,11}; \quad \beta = 0,058(R_c - 10,5).$$

Будем считать, что кривые, описывающие поведение бетона при растяжении, подобны аналогичным кривым при сжатии с коэффициентом пропорциональности равном 10.

Уравнения состояния бетона (1)–(6) совместно с уравнениями плоского нестационарного течения с одной пространственной переменной

$$\rho_0 \cdot (\partial U/\partial t) = V \cdot (\partial(\sigma + Q)/\partial r), \\ \partial V/\partial t V = \partial U/\partial r, \quad (7)$$

где r и t – временная и пространственная координаты; U – скорость в направлении r ; σ – напряжение; V – относительный объем; ρ_0 – начальная плотность; Q – искусственная вязкость.

Для решения выписанной системы уравнений удобно применить метод Уилкинса [19].

В начальный момент среда делится на равновесные ячейки:

$$r_i^0 = r_0^0 + \Delta r \cdot i,$$

Причем наряду с “целыми” точками рассматриваются и “полуцелые”. В “целых” узлах сетки аппроксимируется первое уравнение системы:

$$U_j^{n+1/2} = U_j^{n-1/2} + \frac{\Delta t^n}{\Phi_j^n} [\sigma_{j+1/2}^n - \sigma_{j-1/2}^n + Q_{j+1/2}^{n-1/2} - Q_{j-1/2}^{n-1/2}],$$

где $\sigma_{j-1/2}^n$ определяется из уравнений (1)–(7).

$$I_j^n = \frac{1}{2} [\rho_{j+1/2}^0 \left(\frac{r_{j+1}^n - r_j^n}{V_{j+1/2}^n} \right) + \rho_{j-1/2}^0 \left(\frac{r_j^n - r_{j-1}^n}{V_{j-1/2}^n} \right)].$$

В “полуцелых” узлах уравнение неразрывности в конечно-разностном виде можно записать так:

$$V_{j+1/2}^{n+1} = V_{j+1/2}^n \Delta t^{n+1/2} \left(\frac{\rho_0}{m} \right)_{j-1/2} (U_{j+1}^{n+1/2} - U_j^{n+1/2}),$$

$$m_{j+1/2} = \frac{\rho^0}{U} (r_{j+1}^n - r_j^n).$$

По найденным значениям $U_j^{n+1/2}$ определяются $\dot{\varepsilon}_{j+1/2}^{n+1/2}$ и $\varepsilon_{j+1/2}^{n+1/2}$:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{U_{j+1}^{n+1/2} - U_j^{n+1/2}}{r_{j+1}^{n+1/2} - r_j^{n+1/2}}, \quad \varepsilon_{j+1/2}^{n+1/2} = \varepsilon_{j+1/2}^{n-1/2} + \dot{\varepsilon} \Delta t^{n+1/2},$$

где $r_j^{n+1/2} = 0,5(r_j^{n+1} + r_j^n)$, а $r_j^{n+1} = r_j^n + U_j^{n+1/2} \cdot \Delta t^{n+1/2}$.

Искусственную вязкость можно взять в одном из двух вариантов – линейную:

$$Q_{j+1/2}^{n+1/2} = C_L \cdot c \cdot \rho_0 |U_{j+1}^{n+1/2} - U_j^{n+1/2}| \cdot \frac{1}{V_{j+1/2}^{n+1/2}},$$

или квадратичную:

$$Q_{j+1/2}^{n+1/2} = \frac{C_K^2 \cdot \rho_0}{V_{j+1/2}^{n+1/2}} (U_{j+1}^{n+1/2} - U_j^{n+1/2})^2.$$

Она вычисляется только тогда, когда $U_{j+1}^{n+1/2} \leq U_j^{n+1/2}$ и $V_{j+1/2}^{n+1} \leq V_{j+1/2}^n$. (Здесь $C_L \approx 1/2$, $C_K = 2$, c – местная скорость звука).

В качестве краевых условий на левом конце задается напряжение как функция времени, а правый конец считается либо жестко закрепленным $U(L, t) \equiv 0$, либо свободным $\sigma(L, t) \equiv 0$.

Шаг по времени выбирается как из условия устойчивости, которое представляет собой видоизмененную форму условия фон Неймана-Рихтмайера:

$$\Delta t^{n+3/2} = \frac{1}{3} \frac{r_{j+1}^{n+1} - r_j^{n+1}}{\sqrt{c^2 + 4C_K^2 (r_{j+1}^{n+1} - r_j^{n+1}) \cdot (\dot{V}/V)^{n+1/2}}} \Big|_{(\min_{noj})},$$

$$\Delta t^{n+1} = 0,5(\Delta t^{n+3/2} + \Delta t^{n+1/2}),$$

так и условий точности интегрирования уравнения (1).

По описанной выше методике составлена и отлажена программа. Тестирование системы уравнений в частных производных проводилось при постоянной нагрузке на левом конце и линейной зависимости между напряжениями и деформациями путем сравнения полученного решения с результатами других авторов.

Тело считалось разрушенным, если деформация растяжения превышала $1,2 \cdot \varepsilon_R$. Учитывая связь между σ и ε , можно утверждать, что такой подход соответствует интегралу накопляемости Бейли при $m = 1$.

Результаты предварительных исследований условий разрушения бетона

Рассмотрим некоторые результаты, полученные по описанному выше алгоритму. Нагрузка, приложенная к поверхности (“к левому концу”), считалась известной и задавалась следующим образом: $\sigma(0, t) = \sigma_m \cdot f(t)$.

$$f(t) = \begin{cases} 4t/t_m, & 0 \leq t \leq 0,25t_m \\ 4/3(1 - t/t_m), & 0,25t_m \leq t \leq t_m \\ 0, & t > t_m \end{cases}$$

В расчетах моделировалось разрушение одномерного бетонного образца, для которого варьировались: прочность $R_c, R_c = (50-200)$ МПа; длина (толщина) $L, L = (0,15-0,45)$ м; максимум нагрузки $\sigma_m, \sigma_m = (7,5-60)$ МПа и время ее приложения $t_m, t_m = (12,5-100)$ мкс; краевые условия на правом конце (противоположной поверхности).

На рис. 1–4 представлены распределения основных характеристик процесса $\sigma(r, t)$, $\dot{\varepsilon}(r, t)$, $\varepsilon(r, t)$, $V(r, t)$ по длине (толщине) образца для $t = (0,15; 0,37; 0,54; 0,73) \cdot 10^{-4}$ с при следующих значениях входных параметров: $R_c = 200$ МПа; $\sigma_m = 15$ МПа; $L = 0,15$ м; $t_m = 50$ мкс; $U(L, t) = 0$.

Кривые I иллюстрируют распространение исходной волны сжатия в свободном объеме, так как возмущение еще не достигло правого конца (противоположной стороны); кривые II – начало формирования отраженной волны; кривые III – ее дальнейшее развитие; кривые IV – полностью сформировавшуюся волну растяжения, действие которой и может привести к разрушению объекта.

Аналогичные качественные и близкие количественные результаты получены для $R_c = 150$ МПа и $R_c = 100$ МПа. Однако, начиная с $t = 0,7 \cdot 10^{-4}$ с результаты расчетов показывают разницу более чем на 25%. На рис. 5 для этого момента времени приведены деформации для указанных трех прочностей. В дальнейшем эти различия нарастают. Для второго и третьего образца условие разрушения выполняются при $t_2 = 0,77 \cdot 10^{-4}$ с, $t_3 = 0,80 \cdot 10^{-4}$ с соответственно, а в первом образце происходит постепенное затухание напряжения. Для него максимальная растягивающая деформация ε составляла $0,149 \cdot 10^{-3}$ и была достигнута при $t = 0,768 \cdot 10^{-4}$ с.

Были проведены расчеты для оценки влияния длины образцов на деформацию. При $L = 0,3$ м, $R_c = 150$ МПа и прежнем законе нагрузки наибольшее значение деформации разрушения при ε_+ было $0,162 \cdot 10^{-3}$ при $t_+ = 0,149 \cdot 10^{-3}$ с, а $\varepsilon_- = -0,277 \cdot 10^{-3}$ при $t_- = 0,584 \cdot 10^{-4}$; при прочностях 100 и 50 МПа требуемые для разрушения растяжения были достигнуты при временах $(0,16$ и $0,175) \cdot 10^{-3}$ с. Максимальные деформации сжатия и времена, при которых они были получены, равнялись соответственно $\varepsilon_-^{(2)} = -0,320 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_-^{(3)} = -0,390 \cdot 10^{-3}$, $t_-^{(2)} = 0,71 \cdot 10^{-4}$ с, $t_-^{(3)} = 0,85 \cdot 10^{-4}$ с.

При увеличении L до 0,45 м при расчетах, проведенных при последних двух прочностях, также были зафиксированы разрушения, то есть слагаемое, характеризующее вязкость бетона, уменьшается вместе с уменьшением интенсивности волны, и распространение напряжения происходит почти без потерь, в частности при изменении L от 0,15 до 0,45 м ε_- – уменьшается меньше, чем на 10%.

Достигнуть критического значения ε_- для бетона с $R_c = 150$ МПа можно увеличивая значение σ_m до 250 МПа, ε_- при этом равнялась $-0,383 \cdot 10^{-3}$.

Оставляя фиксированной площадь под кривой $f(t)$ варьировалось время активного нагружения t_m и значение максимального напряжения σ_m . Было получено три варианта со следующими значениями t_m, σ_m :

- 1) $t_m^{(1)} = 12,5 \cdot 10^{-6}$ с, $\sigma_m = 60$ МПа;
- 2) $t_m^{(2)} = 25 \cdot 10^{-6}$ с, $\sigma_m = 30$ МПа;
- 3) $t_m^{(3)} = 100 \cdot 10^{-6}$ с, $\sigma_m = 7,5$ МПа;

$R_c = 150$ МПа, $L = 0,3$ м. Максимальные сжимающие деформации значительно отличались и составляли: $\varepsilon_-^{(1)} = -0,738 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_-^{(2)} = -0,398 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_-^{(3)} = -0,157 \cdot 10^{-3}$.

Разница между ε_+^i ($i = 1, 2, 3$) не превышала 15%. Увеличение ε_- естественно объясняется более высокой скоростью нарастания напряжения и его концентрацией в более узкой зоне. Энергия отраженной волны уходит в основном на растяжение сжатого вещества до первоначального состояния, а чистое растяжение происходит приблизительно одинаково.

В литературе отмечается, что специальный вид бетона – фибробетон (не исключено, что по своим свойствам вновь образовавшиеся минеральные среды в аварийном 4-м блоке ЧАЭС хотя бы в отдельных местах такие же) работает на растяжение значительно лучше обычного. Для моделирования его поведения коэффициент подобия для образования диаграммы σ – ε в области растяжения брался равным 5. В этом случае при $t_m = 50 \cdot 10^{-6}$ с, $\sigma_m = 15$ МПа, $L = 0,3$ м выполнение условий разрушения наблюдалось только для $R_c = 50$ МПа, ε_- при этом, естественно, оставалась неизменной.

Важную роль в развитии волновых процессов играют краевые условия. Для свободного правого конца – $\sigma(L, t) \equiv 0$, были проведены расчеты для таких значений входных параметров: $L = 0,15$ м, $\sigma_m = 15$ МПа, $R_c^{(1)} = 50$ МПа, $R_c^{(2)} = 100$ МПа, $R_c^{(3)} = 150$ МПа.

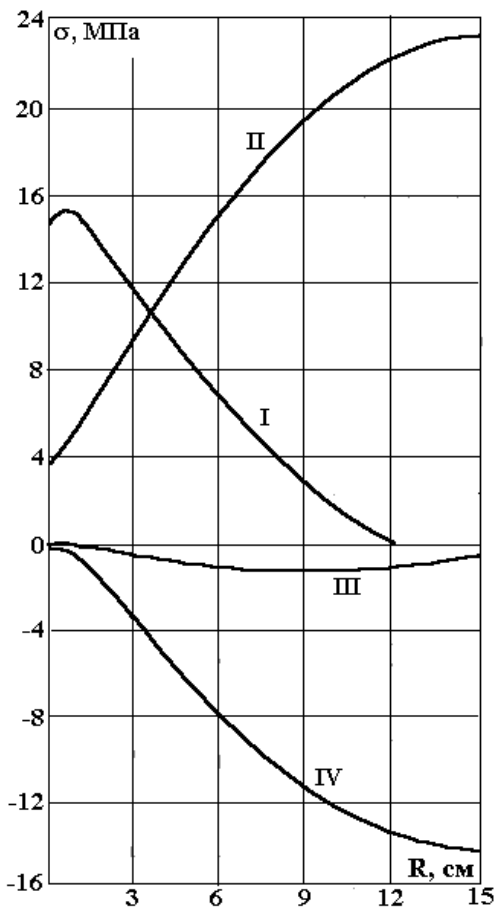


Рис. 1. Распределение напряжений по длине тела для моментов времени, мс:
I – 0,015; II – 0,037; III – 0,054; IV – 0,073.

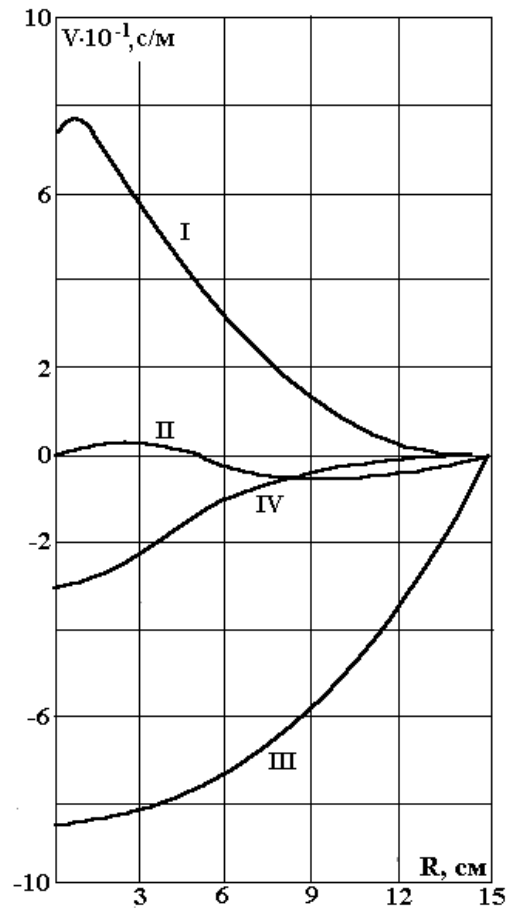


Рис. 2. Распределение волновой скорости по длине тела для моментов времени
I – IV – см. рис. 1.

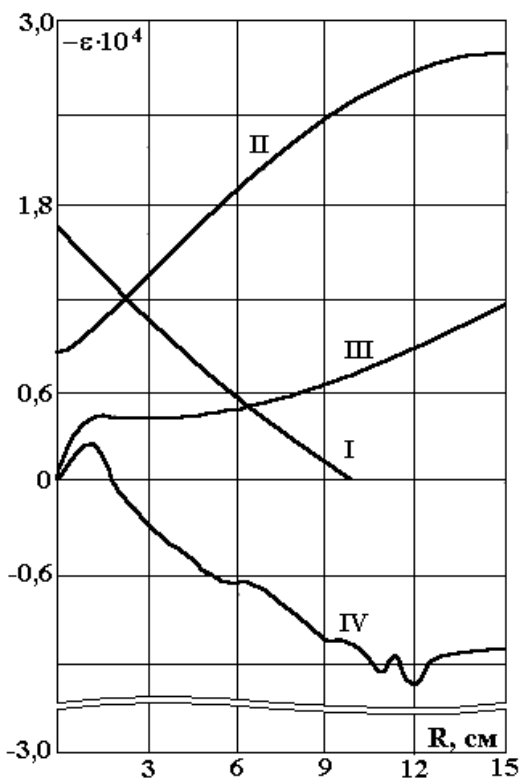


Рис. 3. Распределение относительной деформации по длине тела для моментов времени:
I – IV – см. рис. 1.

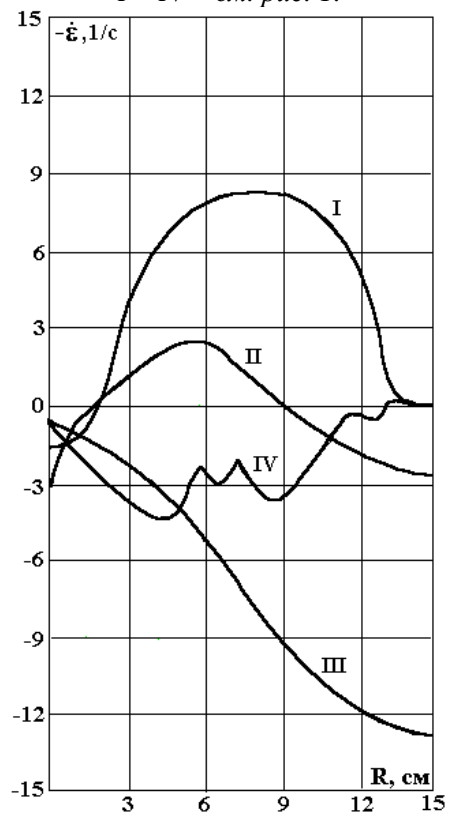


Рис. 4. Распределение скорости деформации по длине тела для моментов времени:
I – IV – см. рис. 1.

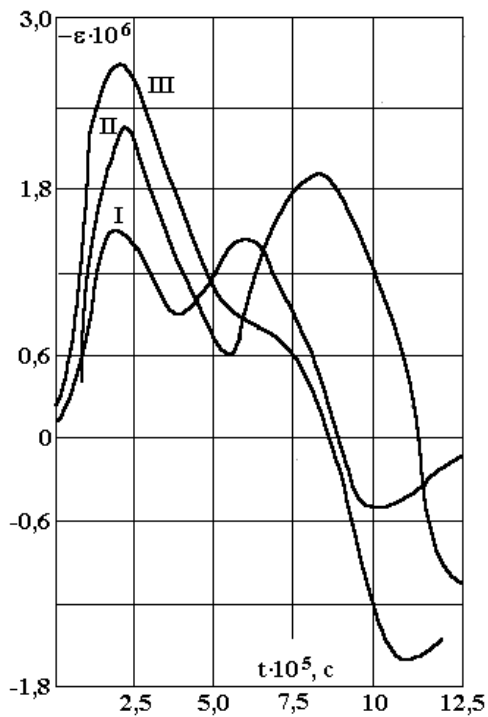


Рис. 5. Распределение относительной деформации по длине тела для момента времени 0,07 мс при различной прочности бетона, МПа: I – 200; II – 150; III – 100.

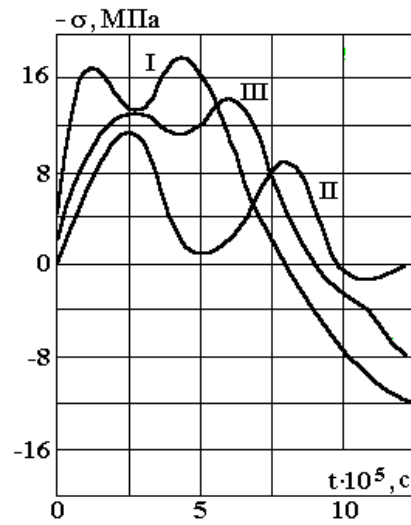


Рис. 6. Зависимость напряжений во времени для различных r и R_c .

Разрушение было зафиксировано только для $R_c = 50$ МПа; $\varepsilon_+^{(3)}, \varepsilon_+^{(2)}$ равнялись $0,458 \cdot 10^{-4}$ и $0,773 \cdot 10^{-4}$. Изменилось место, в котором деформация растяжения достигает своего максимального значения. Если в первом случае для закрепленного конца оно находилось около правого края, то во втором – в середине образца.

Расчеты проводились и для случая, когда поведение правого края образца моделировалось условием $U_x \cdot a + U_t = 0$, которое физически задает силу, препятствующую движению тела и пропорциональное скорости тела. Коэффициент a зависит от модуля упругости тела, площади его поперечного сечения и других механических характеристик. Для $R_c = 100$ МПа было рассчитано несколько вариантов. Для $a = 1000$ откола в образце не произошло, $\varepsilon_+ = 0,121 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_- = -0,270 \cdot 10^{-3}$, а при $a = 300$, то есть в случае более близком к условию жесткого закрепления ($a = 0$), разрушение наступает.

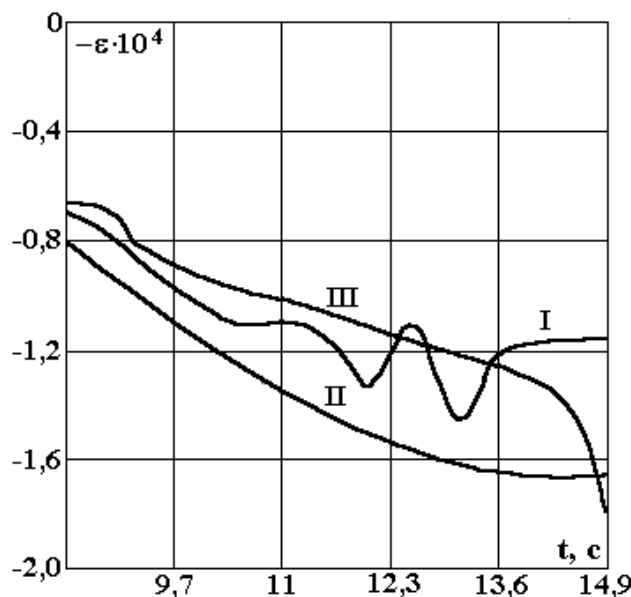


Рис. 7. Зависимость относительной деформации по глубине воздействия волны давления: I – 0,15 м, 50 МПа; II – 0,15 м, 150 МПа; III – 0,28 м, 150 МПа.

На рис. 6 приведена зависимость напряжения $\sigma(r, t)$ от времени при $r = 0,06$ м, $R_c^{(1)} = 150$ МПа, и при $r = 0,225$ м при двух значениях прочностей $R_c^{(1)} = 150$, $R_c^{(2)} = 50$ МПа. Из сравнения кривых 1, 2 видна роль вязкости; хотя решается плоская задача, есть затухание начального возмущения. Характерные “подъемы” напряжения на всех трех графиках связаны с приходом отраженной волны от правого края. Поскольку скорость звука в первом варианте больше, чем во втором, то изменение всех параметров при $R_c^{(1)}$ происходят интенсивнее.

Те же замечания верны и для рис. 7, где представлено изменение $\varepsilon(r, t)$ при $r = 0,15$, $R_c^{(1)} = 50$ МПа, $R_c^{(2)} = 150$ МПа; $r = 0,28$ м, $R_c^{(2)} = 150$ МПа. Кривая 1 первоначально идет выше кривой 2, так как при меньшей прочности получают большие деформации. Поведение кривой 3 обусловлено близким расположением закрепленного правого конца. Здесь сначала происходит значительное сжатие тела, а затем формируется отраженная волна растяжения.

Начало отсчета на обоих рисунках для каждой тройки кривых совмещено.

Выводы

В результате теоретического анализа в одномерном приближении отслежено влияние основных входных параметров импульса давления на волновой процесс в бетоне, моделирующем ТСМ, и получить подробное описание его поведения до начала разрушения. Полученные результаты допускают ясное физическое толкование.

Реальное разрушение будет происходить при неоднократном малоцикловом нагружении объекта воздействия. Практически это означает, что тело станет разрушаться относительно медленно, поэтапно, как бы с накоплением отдельных микроразрушений, постепенно перерастающих в макроразрушения. Предел прочности бетона при таких нагрузках уменьшается, **причем уменьшение зависит от числа циклов нагрузки-разгрузки** и асимметрии цикла ρ (здесь $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max}$). Поэтому при создании электровзрывных рабочих органов разрушения ТСМ в объекте “Укрытие” необходимо рассмотреть вопросы обеспечения их работы в режимах, связанных с обеспечением способа общего разрушения через накопление микро- и миллиразрушений.

Отметим, что пока остались детально не рассмотренными вопросы о влиянии трещиноватости объекта на его прочность, хотя по экспериментальным данным, описанным далее, она играет важную роль при расчете волн напряжения и оказывает большое влияние на параметры дробления. Ситуация усугубляется особенностями работы бетона, для которого отсутствуют надежные данные о его поведении при многоосном нагружении (особенно при динамических нагрузках).

Именно поэтому существенной становится роль последующих экспериментальных исследований, предшествующих НИОКР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барьяхтар В.Г., Иванов А.И., Ключников А.А., Краснов В.А. Об основных аспектах стратегии создания робототехнических комплексов для преобразования объекта “Укрытие” // Научно-технический сборник “Проблемы Чернобыля”. Вып. 1. Чернобыль, НАН Украины, 1997. С. 7–10.
2. Щербин В.Н. Безопасность объекта “Укрытие”. Там же. С. 68–75.
3. Гаврилов Г.Н., Горovenko Г.Г., Малюшевский П.П., Рябинин А.Г. Разрядно-импульсные технологии обработки минеральных сред. Киев, 1979.
4. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск, 1979.
5. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1966.
6. Нелинейные волновые процессы / Под ред. В.Н. Николаевского. М., 1987.
7. Гердюков Н.Н., Иоилев А.Г., Новиков С.А. Исследование распространения сферической взрывной волны по песчаному грунту // ПМТФ. 1993. № 2. С. 10–11.
8. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск, 1979.
9. Кузьмина В.С., Кукуджанов В.Н. К моделированию откольного разрушения при соударении пластин // МТТ. 1986. № 3. С. 99–104.
10. Грушко А.И. Исследование откола как процесса образования микропор // МТТ. 1978. № 5. С. 132–140.
11. Грушко А.И., Нешеретов И.И. О кинетическом подходе к разрушению горных пород // МТТ. 1986. № 6. С. 140–146.
12. Основы теории и методы взрывного дробления горных пород / Под ред. В. Комира. Киев, 1979.

13. Волков И.А. Численное исследование откольного разрушения при ударно-волновом нагружении // Физика горения и взрыва. 1992. № 1. С. 98–105.
14. Нелинейные волновые процессы / Под. ред. В.Н. Николаевского. М., 1987.
15. Рыков Г.В., Обледов В.П., Майоров Е.Ю. и др. Экспериментальное исследование процессов деформирования и разрушения бетонов при интенсивных динамических нагрузках // Строительная механика и расчет сооружений. 1988. № 5. С. 54–59.
16. Рыков Г.В., Скобеев А.М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. М., 1978.
17. Рыков Г.В., Обледов В.П., Абрамкина В.Т. и др. Механические характеристики бетонов с учетом их разрушения при кратковременных динамических нагрузках // Строительная механика и расчет сооружений. 1989. № 4. С. 31–34.
18. Рыков Г.В., Свиридов Н.В., Майоров Е.Ю. и др. Механические характеристики особо прочных цементных бетонов при кратковременных динамических нагрузках // Строительная механика и расчет сооружений. 1991. № 3. С. 45–52.
19. Котляревский В.А. и др. Убежища гражданской обороны. Конструкция и расчет. М., 1989.

Поступила 22.08.01

Summary

In work the theoretical analysis of conditions in which electric explosion should be reproduced at use in object "Shelter" for destruction and crushing of fuel-bearing weights is carried out. It is shown, that lavas and concrete weights covering them at multipulse electrodigit influence can be gradually destroyed due to accumulation of microdestructions. Such way of destruction and crushing new materials in emergency 4-th block CHNES can be attributed to sparing, that is safe for the building designs damaged by explosion at the moment of failure.
