

УДК: 661.11

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРИСТОГО БЕТОНА В КАЧЕСТВЕ ЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОНТЕЙНЕРА

А.Г. Казанцев, С.С. Смольянин, Л.Б. Первухин, П.А. Николаенко, Р.Д. Капустин

Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения,  
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН

### Аннотация

Полученные результаты показывают перспективность применения пористого бетона ВБФ-650 в качестве энергопоглощающего материала при создании конструкций для локализации взрывного воздействия.

**Ключевые слова:** бетон, ударная волна, алюмосиликат

### Введение

С использованием численного моделирования и на основе экспериментов исследовано воздействие ударной взрывной волны на стенку металлического герметичного контейнера. Рассмотрено два варианта изготовления контейнера: с внутренней защитой из пористого алюмосиликатного бетона типа ВБФ-650 и без внутренней защиты (пустотелого).

Выполнен анализ влияния массы заряда на величину пластических деформаций и на-

пряженно-деформированное состояние (НДС) металлической оболочки контейнера. Оценена эффективность использования пористого энергопоглощающего материала для снижения нагруженности оболочки при подрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ) внутри контейнера.

Размеры оболочки корпуса контейнера схематично представлены на рис.1. Корпус имеет эллиптические доньшки, наружный диаметр оболочки – 530мм, длина цилиндрической части – 500мм, толщина стенки – 8мм. Заряд сферической формы располагался в центре контейнера.

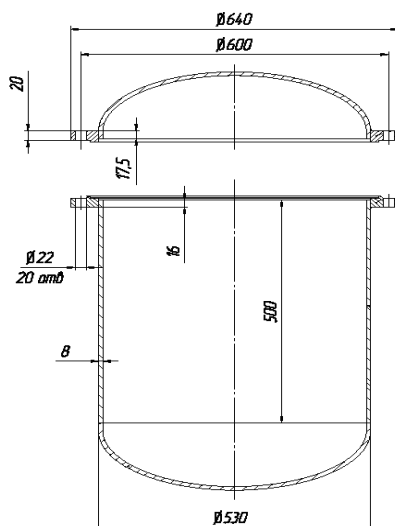


Рис. 1 – Схема корпуса контейнер

Расчет напряженно-деформированного состояния контейнера проводился с использованием метода конечных элементов на основе решения соответствующих динамических уп-

ругопластических задач с явной схемой интегрирования по времени.

Решение осуществлялось в трехмерной постановке.

При построении модели были использованы восьмиузловые объемные конечные элементы. При вычислении внутренних сил в узлах конечных элементов учитывалась состав-

ляющая демпфирующих усилий, определяемых массой и скоростью. Конечно-элементная сетка контейнера представлена на рис. 2.

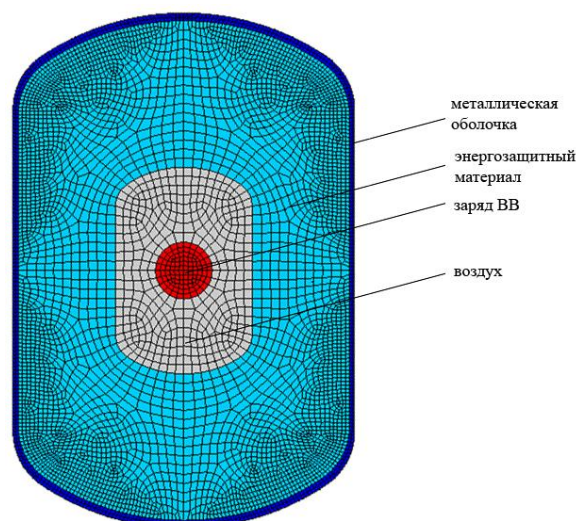


Рис. 2 – Конечно-элементная модель контейнера с энергопоглощающим материалом

Различные составные части контейнера проявляют различные типы механического поведения. Металлическая оболочка испытывает относительно небольшие пластические деформации, взрывчатое вещество, воздух и пористый материал подвергаются большим деформациям; кроме того, происходит перемешивание продуктов подрыва ВВ и воздуха.

В связи с этим при построении объемной конечно-элементной модели контейнера для описания движения сплошной среды использовался лагранжев и комбинированный лагранжево-эйлеров подходы [1].

В чисто лагранжевой формулировке, используемой для металлической оболочки, сетка конечных элементов деформируется вместе с материалом таким образом, что отсутствует перетекание материала между элементами. При изменении формы изделия (деформации во время взрыва) конечные элементы оболочки деформируются и перемещаются вместе с материалом. Данный подход применяется преимущественно для решения задач с относительно небольшими деформациями.

Для пористого материала, взрывчатого вещества и воздуха были использованы конечные элементы, учитывающие большие деформации и перемещения и поддерживающие многокомпонентную лагранжево-эйлерову формулировку уравнений движения. В многокомпонентной лагранжево-эйлеровой формулировке материал течет через движущуюся в

пространстве конечно-элементную сетку (в чисто эйлеровом подходе сетка неподвижна). При этом каждый элемент может содержать смесь нескольких материалов.

Для описания поведения стали 09Г2С, из которой изготовлена оболочка контейнера, использовалась модель упругопластического материала с кинематическим упрочнением. Зависимость параметров упрочнения от скорости деформации учитывалась на основе соотношения Купера-Саймонда, в котором динамическое напряжение текучести определяется суммой статического напряжения  $\sigma_i(\varepsilon_i^p)$ , задаваемого кривой статического деформирования и начального напряжения текучести  $\sigma_T$ , умноженного на член, зависящий от скорости деформации:

$$\sigma_i(\varepsilon_i^p, \dot{\varepsilon}_i^p) = \sigma_i(\varepsilon_i^p) + \sigma_T \left( \frac{\dot{\varepsilon}_i^p}{C} \right)^p$$

где  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i^p$  – соответственно, интенсивность напряжений и интенсивность пластических деформаций,

$\dot{\varepsilon}_i^p$  – скорость интенсивности пластических деформаций,  $c$  и  $p$  – константы материала. Для стали 09Г2С  $c = 10^{11}$ ,  $p = 11$ , модуль упругости  $2 \cdot 10^5$  МПа.

Характеристики стали (для температуры 20 °С), используемые в расчете, приведены в табл. 1. Свойства взрывчатого вещества (тро-

тил) описывались уравнением состояния Джонса-Уилкинса-Ли (JWL), позволяющим моделировать детонацию.

Таблица 1 – Механические свойства стали 09Г2С

Плотность	7800 кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	2,1×10 <sup>5</sup> МПа
Коэффициент Пуассона	0,3
модуль упрочнения	585 МПа
Предел текучести $\sigma_T$	300 МПа
Предел прочности $\sigma_B$	492 МПа
Относительное удлинение	30 %
Относительное сужение, $\Psi$	76%

Уравнение состояния JWL широко применяется в численных методах моделирования ударных волн из-за своей простоты. Уравне-

ние состояния JWL содержит параметры, определяющие соотношения между объемом, энергией и давлением продуктов детонации:

$$P = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \cdot \exp(-R_1 V) + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \cdot \exp(-R_2 V) + \frac{\omega \cdot E}{V}, \quad (1)$$

где  $E$  – внутренняя энергия на единицу объема,

$V$  – относительный удельный объем, а

$A, B, \omega, R_1, R_2$  – эмпирические коэффициенты, полученные экспериментальным путем.

Параметры уравнения состояния (1) и свойства тротила (ТНТ) представлены в табл. 2-3 [1, 2].

Таблица 2 – Параметры уравнения состояния ТНТ

Переменная	$A$	$B$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$
Значение	371,2·10 <sup>9</sup> Па	3,231·10 <sup>9</sup> Па	4,15	0,95	0,3	7·10 <sup>9</sup> Па

Таблица 3 – Характеристики ТНТ

Плотность	1640 кг/м <sup>3</sup>
Скорость детонации	6930 м/с
Давление Чэпмена-Жуге	21·10 <sup>9</sup> Па

Свойства воздуха описывались уравнением состояния идеального газа. Материал защиты, как отмечено выше, представляет собой алюмосиликатный высокопористый бетон типа ВБФ-650 (плотность 650 кг/м<sup>3</sup>), рис. 3, получаемый на основе процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-процесса). Поры материала преимущественно замкнутого типа возникают вследствие выделения водорода и др. газов при взаимодействии наполнителя (ВБФ) и связующего (ортофосфорная кислота). Их величина зависит от весового соотношения наполнителя и связующего, возможности свободного расши-

рения (вспучивания) смеси при протекании СВС-процесса и затвердевании. В нашем случае средние линейные размеры пор составляли около 5 мм.

Деформирование материала защиты при приложении нагрузки сопровождается хрупким разрушением межпоровых перегородок, как это происходит и в других пористых керамических материалах [3-7]. В связи с этим поведение данного материала существенно отличается от деформирования пористых сред на основе металлов или вспененных полимеров, характеризующихся преимущественно упругопластическим или эластичным поведением.

Для описания поведения пористого материала защиты использовалась модель, учитывающая разрушение пор и уплотнение материала при сжатии. Коэффициент Пуассона принимался равным нулю. Параметры уравнения состояния были получены на основе соот-

ветствующих экспериментов на сжатие с регистрацией диаграмм деформирования. При их проведении испытываемый материал в виде цилиндрического образца помещался в металлическую обойму и нагружался через пуансон сжимающей нагрузкой, рис. 4.

Диаграмма сжатия, приведенная на рис. 5, дана в координатах «сжимающее напряжение – истинная (логарифмическая) деформация».

Исследование влияния скорости нагружения на диаграмму деформирования близко по свойствам керамического материала типа шамота проводилось в работе [3]. Данные этих исследований показали отсутствие существенного влияния скоростных эффектов, в связи с чем в расчетах использовалась статическая диаграмма.

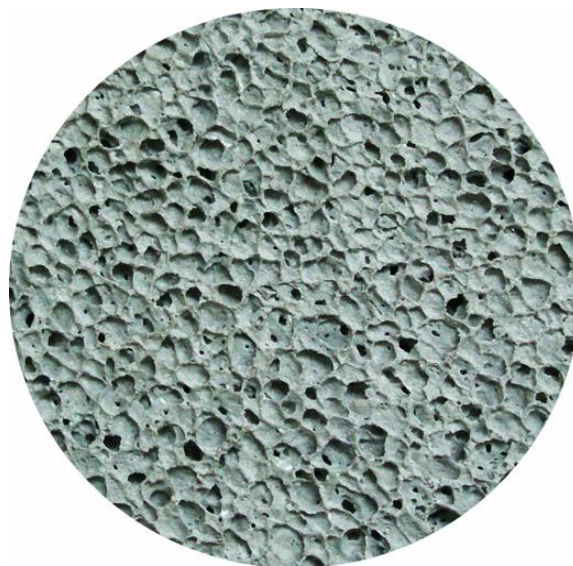


Рис. 3 – Структура пористого бетона ВБФ-650 (диаметр сечения образца 90мм)

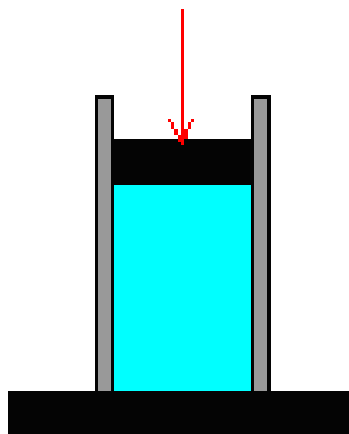


Рис. 4 – Схемы нагружения образца в обойме

Расчет НДС оболочки контейнера, изготовленного с использованием энергопоглощающего материала и пустотелого, выполнялся при величине заряда ВВ от 200 до 1100 г ТНТ. На основе полученных данных установлена зависимость максимальных пластических деформаций от величины заряда, определены поля напряжений и деформаций в оболочке, величина действующего на стенки контейнера

давления и характер изменения указанных величин во времени. Результаты расчета показали, что в оболочке после подрыва возникают затухающие колебания. При подрыве в пустотелом контейнере наблюдается несколько пиков максимальных напряжений, процесс затухает практически после 0,008 сек. При применении защитного материала напряжения максимальны при первом нагружении, рис. 6, за-

тухание колебаний происходит существенно быстрее, чем без защиты – за 0,002 сек, за счет

демпфирующих свойств энергопоглощающего материала.

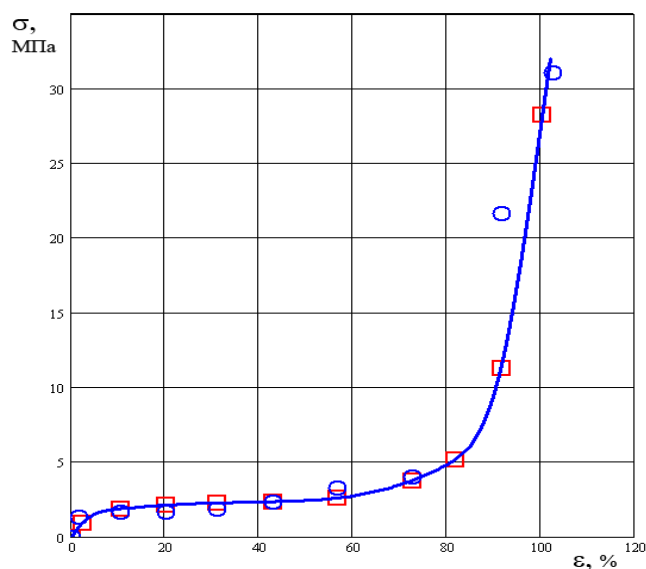
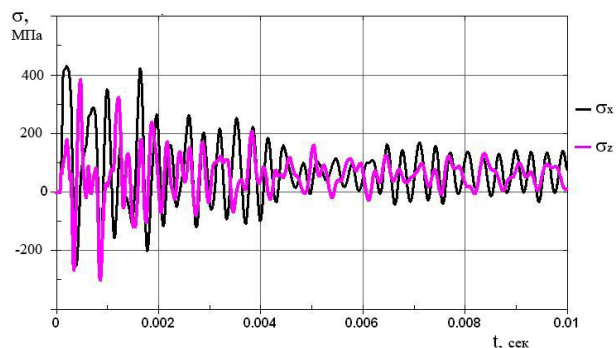


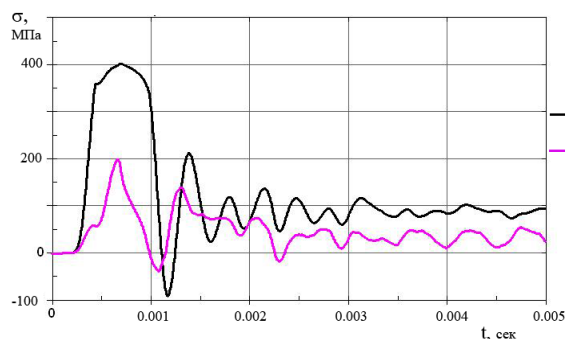
Рис. 5 – Диаграмма деформирования энергопоглощающего материала при сжатии

Частота колебаний оболочки пустотелого контейнера составляет примерно 3,25 кГц. В контейнере с энергопоглощающим материалом длительность первого цикла колеба-

ний около 0,001 сек (что соответствует частоте 1 кГц), затем частота колебаний возрастает примерно до 3 кГц.



а



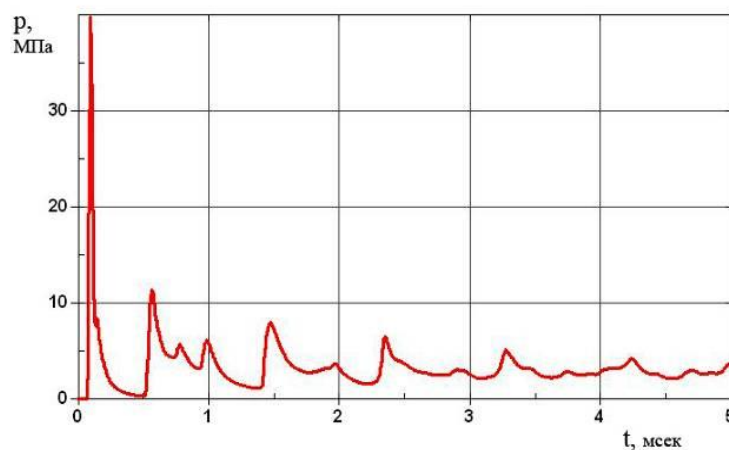
б

а – заряд ВВ массой  $m=600$  г, пустотелая оболочка;  
 б – заряд ВВ массой  $m=900$  г, с энергопоглощающим материалом

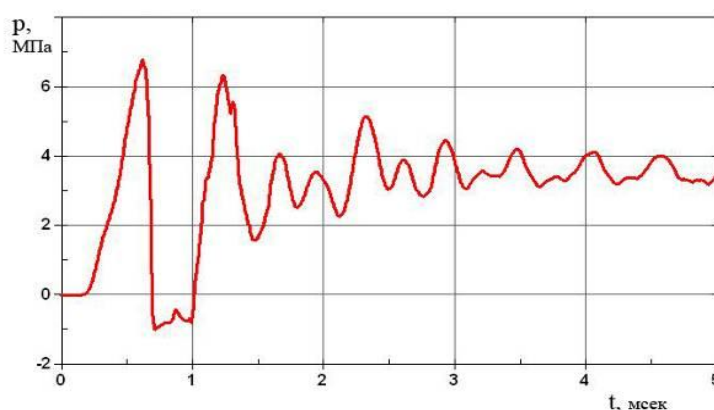
Рис. 6 – Изменение во времени величины компонент напряжений

Характер изменения давления, действующего на цилиндрическую стенку контейнера в зоне напротив заряда в пустотелом контейнере и в контейнере с энергопоглощающим материалом, показан на рис. 7. Видно, что при

использовании энергопоглощающего материала первый максимальный импульс давления более растянут по времени, величина давления существенно ниже, чем в контейнере без защиты.



а



б

Рис. 7 – Изменение во времени давления на стенку контейнера при подрыве пустотелого контейнера (а) и контейнера с энергопоглощающим материалом (б)

При значениях массы заряда ВВ более 400г для пустотелой оболочки и 700 г для оболочки с энергопоглощающим материалом образуются пластические деформации. В пустотелой оболочке наиболее нагруженными зонами являются центральные части днищ. При использовании энергозащитного материала величина пластических деформаций максимальна в центральной цилиндрической части контейнера напротив заряда (рис. 8).

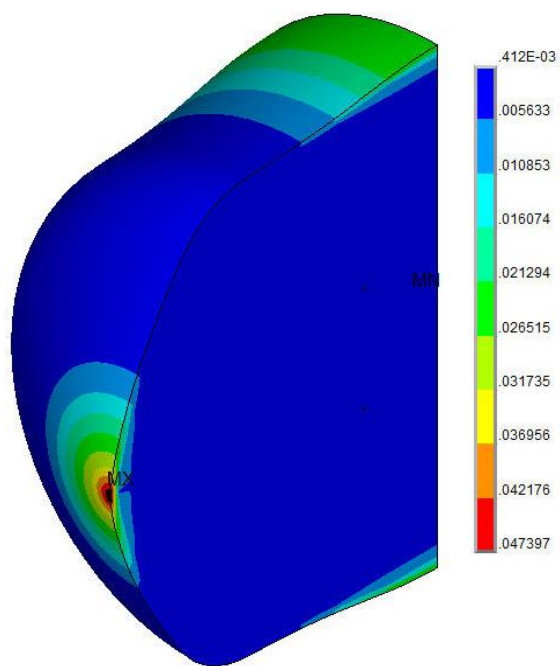
В пустотелом контейнере пластические деформации существенно выше, чем с наполнителем (при одинаковой величине заряда).

Исследование нагруженности контейнера проводилось также экспериментально при подрыве полномасштабных макетов контейне-

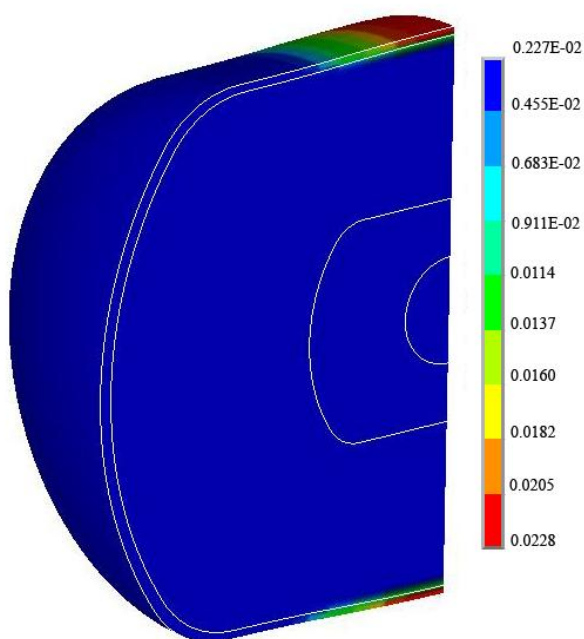
ра, конструктивная схема и внешний вид которых показан на рис. 9-10.

В процессе испытаний выполнялось тензометрирование, оценивались тангенциальные и осевые пластические деформации цилиндрической части оболочки контейнера и степень уплотнения пористого материала защиты после подрыва.

Зависимости интенсивности максимальных пластических деформаций в цилиндрической части обечайки от массы заряда, полученные расчетным путем, а также по данным испытаний при подрыве пустотелого контейнера и контейнера с энергозащитным материалом, приведены на рис. 12. Видно, что результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем соответствии.



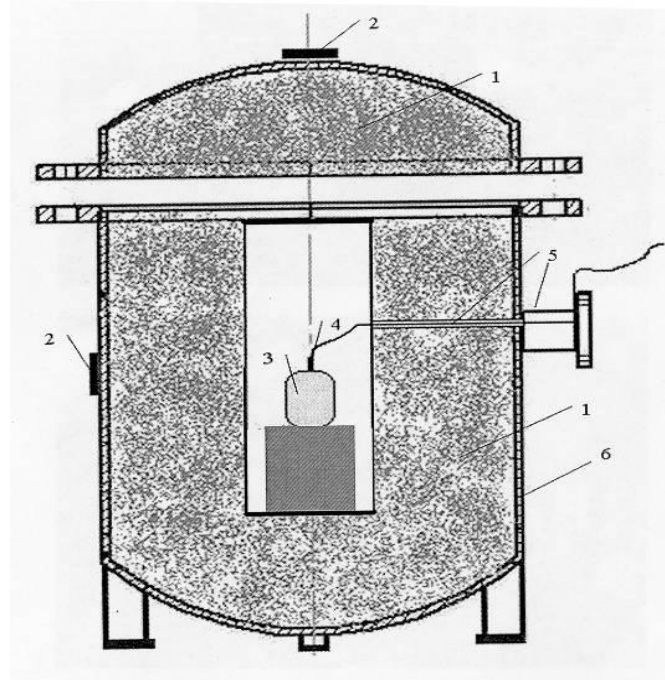
а



б

а –  $m = 600\text{г}$ , пустотелая оболочка,  
 б –  $m = 900\text{г}$ , с энергопоглощающим материалом

Рис. 8 – Распределение интенсивности пластических деформаций (в относительных единицах) в оболочке контейнера после подрыва



1- вспученный бетон, 2 – тензодатчики, 3 – заряд,  
4 – детонатор, 5 – выходной патрубков,  
6 –металлическая оболочка.

Рис. 9 – Конструктивная схема контейнера

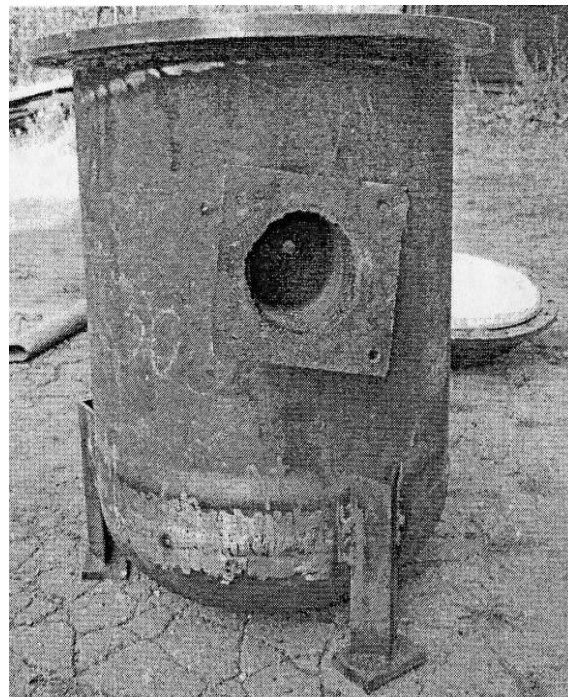
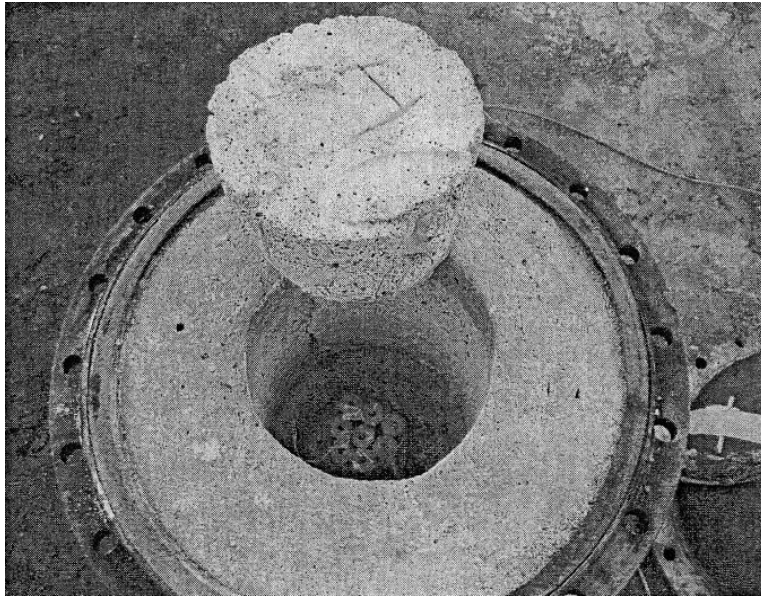
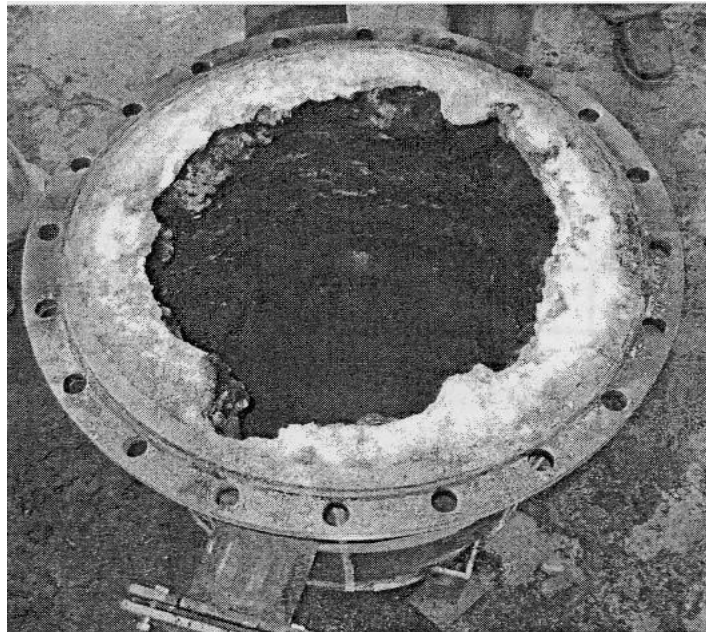


Рис. 10 – Внешний вид контейнера (без крышки)



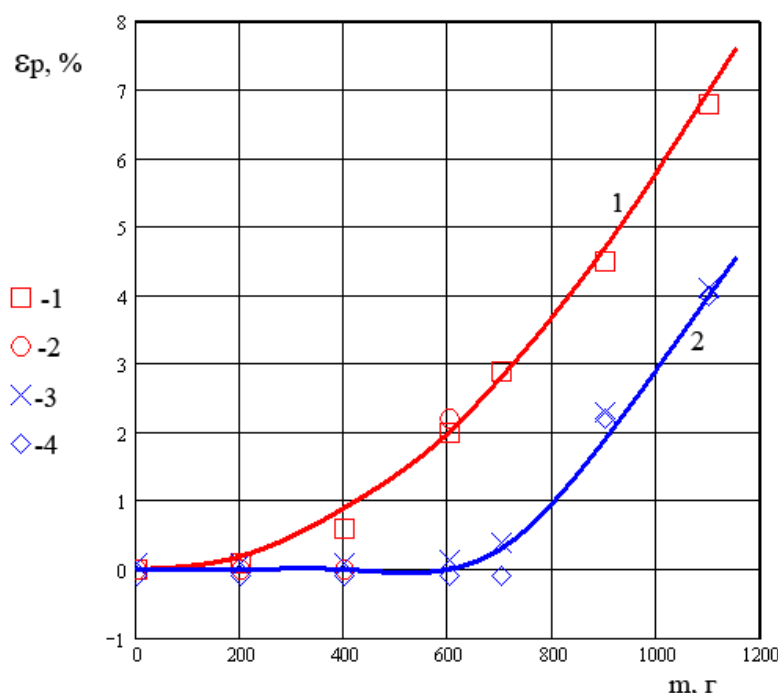


а



б

Рис. 11 – Контейнер с энергозащитным материалом до подрыва (а) и после (б)



Точки – пустотелый контейнер: 1 – расчет; 2 – эксперимент; контейнер с энергопоглощающим материалом: 3 – расчет; 4 – эксперимент

Рис. 12. Зависимость пластических деформаций от массы заряда при подрыве пустотелого контейнера (кривая 1) и контейнера с энергопоглощающим материалом (кривая 2)

Внешний вид защитного пористого материала до и после подрыва показан на рис.11. По данным замеров толщины защитного слоя (при подрыве заряда ВВ массой 900г) установлено, что степень деформации в зоне напротив заряда находится на уровне 80-90%, что соответствует результатам расчета.

В качестве предельного состояния оболочки контейнера можно принять условие достижения деформации пластической неустойчивости, определяемой по диаграмме деформирования материала через напряжение

$$\sigma_f = \frac{\sigma_{0.2} + \sigma_B}{2},$$

где  $\sigma_{0.2}$  – условный предел текучести,  $\sigma_B$  – временное сопротивление.

Для стали 09Г2С с учетом скоростных эффектов напряжение пластической неустойчивости составляет  $\sigma_f = 550$  МПа, деформация пластической неустойчивости  $\varepsilon_f = 3\%$  [7]. Отсюда следует, что использование энергопоглощающего материала позволяет увеличить критическую массу заряда с 700 до 1000 г (рис. 12), т.е. почти в полтора раза.

Полученные результаты показывают перспективность применения пористого бетона ВБФ-650 в качестве энергопоглощающего материала при создании конструкций для локализации взрывного воздействия.

### Выводы

1. Использованная методика расчета НДС взрывного контейнера, основанная на методе конечных элементов и комбинированной лагранжево-эйлеровой формулировке уравнений движения сплошной среды позволяет адекватно описать воздействие взрывной волны на стенку контейнера, как пустотелого, так и с пористым энергопоглощающим материалом, что подтверждается результатами экспериментов.

2. Пористый алюмосиликатный бетон типа ВБФ-650 может эффективно использоваться для снижения взрывного воздействия во взрывозащитных контейнерах.

### Литература

1. Муйземнек А.Ю., Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва

в программе LS-Dyna. Пенза: ИИЦ ПГУ, 2005. 106 с.

2. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва. М.: Физматлит, 2004. Т. 1 – 832 с., т. 2 – 656 с.

3. Хохлов Н.П. и др. Диаграмма ударного деформирования шамота // Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 1, С. 38-43.

4. Брагов А.М. и др. Высокоскоростное деформирование и разрушение диоксидциркониевой керамики // Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. Вып. 62, С. 144-158.

5. Curran, D.R. Dynamic failure of solids / D.R.Curran, L. Seaman, D.A. Shockey // Phys. Rep.; Rev. Sect. J.Phys. Lett, 1987. Vol. 147. No. 5-6, P. 253.

6. Садырин А.И., Пирогов С.А. Определяющие соотношения ударного компактирования шамота // Проблемы прочности и пластичности. 2005. Вып. 67. С. 143-150.

7. Херрманн В. Определяющие уравнения для динамического сжатия пластических пористых материалов // Механика: Сб. пер., М.: Мир, 1970, С. 96-113.

---

### APPLICATION OF POROUS CONCRETE AS A PROTECTIVE MATERIAL WHEN EXPLOSIVE OF A METAL CONTAINER

**A.G. Kazantsev, S.S. Smol'ianin, L.B. Pervuhin, P.A. Nikolaenko, R.D. Kapustin**

Central Research Institute of machine technology,  
Institute of structural makrokinetiki and problems of materials RAS

#### **Abstract**

Received the results of showed of perspektive application of porous concrete ВБФ-650 in quality of absorption of Energy of material When you create a design to locality the explosion.

---

### ЖАРЫЛҒЫШ ЗАТТАР LOADING МЕТАЛЛІ КОНТЕЙНЕРЛЕРГЕ СӘЙКЕС ҚОРҒАНЫШ МАТЕРИАЛ РЕТІНДЕ КЕУЕКТІ БЕТОН ПАЙДАЛАНУ

**А.Г. Казанцев, С.С. Смольянин, Л.Б. Первухин, П.А. Николаенко, Р.Д. Капустин**

Машина жасау орталық ғылыми-зерттеу институты,  
Құрылымдық макрокинетики және материалтану институты

#### **Аннотация**

ВБФ-650 типті кеуекті бетонды жарылғыш әсерін тежеу үшін энергияны жұтып алатын материал ретінде қолданудың перспективтілігін алынған нәтижелерден көрсетілді.