

шения. Для инициирования разрушения необходимо создать в образце растягивающие напряжения, уровень которых определяется характеристиками потенциальных очагов разрушения и должен находиться независимо. Во всяком случае величина работы разрушения может быть использована для оценки возможности полного откола и скорости откольной пластины и является вполне ясной характеристикой материала.

Автор благодарит А. Н. Дремина и А. Л. Ни за полезные дискуссии.

Поступила в редакцию 5/VIII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. L. J. Cohen, И. М. Berkowitz. *Int. J. Fract. Mech.*, 1971, 7, 2, 183.
2. Г. И. Канель, В. В. Щербань. *ФГВ*, 1980, 16, 4, 93.
3. Г. И. Канель. *ФГВ*, 1982, 18, 3.
4. J. H. Smith. *ASTM Spec. Techn. Publ.*, 1962, 336, 264.
5. Б. А. Тарасов. *Проблемы прочности*, 1972, 12, 63.
6. Б. А. Тарасов. *Проблемы прочности*, 1974, 3, 121.
7. L. Seaman, D. R. Curran, D. A. Shockey. *J. Appl. Phys.*, 1976, 47, 11, 4814.
8. Ю. И. Фадеенко.— В сб.: *Динамика сплошной среды (Динамические задачи механики сплошных сред)*. Вып. 32. Новосибирск, 1977.
9. А. Г. Иванов. *ФГВ*, 1975, 11, 3, 475.
10. Г. И. Канель, Л. Г. Черных. *ПМТФ*, 1980, 6.
11. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. *Физика взрыва*. М.: Наука, 1975.

РЕАКЦИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КАМЕР ПРИ ПОДРЫВЕ В НИХ УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ

*А. Г. Иванов, В. А. Могилев, А. А. Сиротов,
В. Н. Софронов, Ю. А. Фатеев
(Москва)*

В связи с развитием научно-технических исследований, в которых используются заряды взрывчатого вещества, растет потребность во взрывных камерах, способных выдерживать подрывы достаточно больших масс ВВ. Традиционно несущая способность (под несущей способностью взрывной камеры понимается предельная масса заряда, подрыв которой не приводит к появлению пластических деформаций в стенке) повышается за счет увеличения массы металла как силового элемента, т. е. увеличения либо толщины стенки, либо габаритов конструкции. В настоящей работе приведены результаты экспериментального и расчетного изучения реакции трехслойной взрывной камеры, один из слоев которой выполнен из бетона.

Эксперимент

Экспериментальная информация о реакции камеры на взрывное нагружение получена в опытах на двух одинаковых образцах, схематический вид и геометрические размеры которых показаны на рис. 1, а характеристики сталей и бетона приведены в таблице. Внутренняя труба образцов имела сварной шов по образующей, а наружная — по винтовой линии. Методика испытаний состояла в том, что от опыта к опыту увеличивалась погонная масса цилиндрического заряда ВВ ($\mu_{ВВ}$) из состава ТГ 50/50, устанавливаемого соосно с трубами, пока не происходило полного разрушения взрывных камер. Аналогичным образом отдельно испытаны трубы, такие же как и те, что входили в состав железобетонных взрывных камер. От опыта к опыту измерялось приращение (u) радиуса внутренней и наружной камер в фиксированных сечениях вдоль

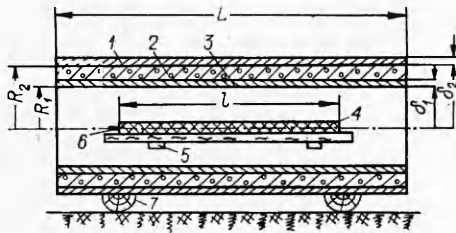


Рис. 1. Схематический вид испытанных образцов.

1 — наружная труба ($R_2=0,5$ м, $L=2,5$ м, $\delta_2=0,01$ м); 2 — бетон; 3 — внутренняя труба ($R_1=0,5$ м, $\delta_1=0,01$ м); 4 — заряд ВВ ($l=2$ м); 5 — рейка; 6 — капсюль; 7 — деревянный ложемент.

образующей со среднеквадратичной погрешностью, не превышающей 0,5 мм.

Характер деформирования наружной трубы камеры вдоль образующей показан на рис. 2, там же приведены аналогичные данные, полученные при испытании отдельных труб. Видно, что деформация труб более равномерна по длине. Максимальная деформация камер наблюдается в сечении, соответствующем 0,7l (l — длина заряда ВВ, отсчет от инициируемого торца заряда), где, согласно [1], стенке камеры сообщается максимальный импульс. Зависимости $u(\mu_{ВВ})$ для внутренней и наружной труб ВК в этом сечении приведены на рис. 3, там же показаны результаты испытаний отдельных труб. Поскольку в опытах $u/R \ll 1$, считается что зависимость $u(\mu_{ВВ})$ сохранится и для однократных нагружений.

Подведем итоги экспериментального исследования.

1. Переход железобетонных камер в упруго-пластическую область деформирования происходит при подрыве зарядов с $\mu_{ВВ} = 2,0 \div 2,5$ кг/м, а отдельных труб при $\mu_{ВВ} = 0,5 \div 0,6$ кг/м. Таким образом, как это следует из работы [6], суммарная несущая способность обеих труб $\mu_{ВВ} = 1,0 \div 1,1$ кг/м, что примерно вдвое ниже несущей способности железобетонных камер.

2. Разрушение железобетонных камер начиналось с появления трещины во внутренней трубе. Трещина возникала при уровне остаточных деформаций $e \approx 0,3\%$ ($\mu_{ВВ} = 2,2$ кг/м) в то время как отдельные трубы не разрушались при $e = 1\%$. Таким образом, увеличение несущей способности железобетонных камер сопровождается уменьшением пластичности материала труб перед разрушением.

3. Осмотр образцов после опытов и результаты измерений, представленные на рис. 3, показывают, что при нагружении бетон разделяется радиальными трещинами на отдельные блоки и его окружная деформация осуществляется за счет удаления блоков друг от друга в окружном направлении, при этом толщина слоя бетона остается неизменной (это следует из приближенного равенства абсолютных смещений внут-

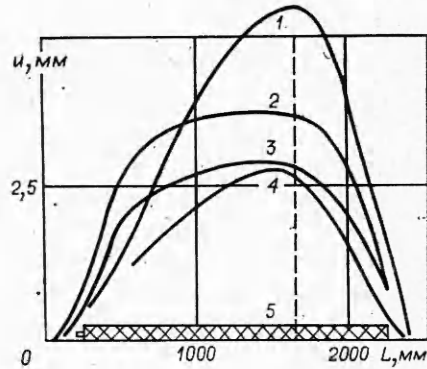


Рис. 2. Характер деформирования труб и взрывной камеры.

1 — взрывная камера 2 ($\mu_{ВВ} = 4,3$ кг/м); 2 — труба ($R=0,5$ м, $\mu_{ВВ} = 1,86$ кг/м); 3 — труба ($R=0,35$ м, $\mu_{ВВ} = 1,03$ кг/м); 4 — взрывная камера 1 ($\mu_{ВВ} = 3,7$ кг/м); 5 — заряд ВВ.

Слой	Материал	$\sigma_T \cdot 10^{-8}$, кг/(м·с ²)	$\sigma_B \cdot 10^{-8}$, кг/(м·с ²)	$E \cdot 10^{-11}$, кг/(м·с ²)	ν	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	n	γ	$k \cdot 10^{-11}$, кг/(м·с ⁴)
Внутренний	Сталь	3,7	5,1	2,1	0,28	7,85	3	3,55	1,60
Средний	Бетон марки 200	—	0,015	0,24	0,30	2,0	3	3,0	0,29
Наружный	Сталь	3,2	4,1	2,1	0,28	7,85	3	3,55	1,60

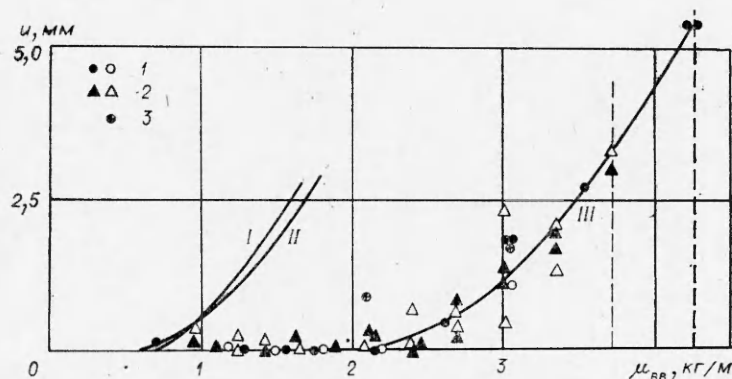


Рис. 3. Результаты испытаний взрывной камеры. I—III — экспериментальные зависимости $u(\mu_{ВВ})$ для внутренней и наружной труб и трехслойной камеры соответственно. 1 — остаточное смещение наружной и внутренней труб взрывной камеры 1; 2 — то же, для взрывной камеры 2; 3 — результаты численного расчета.

ренной и наружной труб). Кроме того, в первом же опыте формируется система волосяных трещин, пронизывающих массив бетона по всем направлениям.

Отмеченный характер поведения бетона при взрывном нагружении свидетельствует об его относительно высокой динамической прочности при работе на сжатие и малой — при воздействии растягивающих нагрузок.

Численный расчет реакции камер

Характер деформации взрывной камеры при внутреннем нагружении исследовался также с помощью численных расчетов, проведенных на ЭВМ БЭСМ-6. Использовалась программа, предназначенная для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движение упруго-пластических сред в одномерном приближении [2]. При этом предусматривалась возможность учета разрушений, возникающих под действием растягивающих окружных и радиальных напряжений, при достижении предела прочности σ_c .

Программы, близкие по своим возможностям, описаны в [3, 4]. Для замыкания системы дифференциальных уравнений необходимо задать для каждого материала уравнение состояния $p = f(\rho, \epsilon)$, а также предел текучести σ_c и коэффициент Пуассона ν . Уравнение состояния стали и бетона выбрано в виде [1]

$$p = \rho(\gamma - 1)\epsilon + k \frac{n(\gamma - 1)(\delta - 1) + (n - \gamma)(\delta^n - 1)}{n(n - 1)},$$

где $\delta = \rho/\rho_0$, ρ и ρ_0 — текущая и начальная плотность материала; $\Gamma = \gamma - 1$ — коэффициент Грюнайзена; ϵ — внутренняя энергия; n — эмпирический коэффициент; k — коэффициент объемного сжатия при нормальных условиях. Численные значения параметров приведены в таблице. Уравнение состояния для продуктов взрыва использовалось в виде, предложенном в [5].

Расчеты проведены в одномерном приближении при мгновенной детонации всего заряда ВВ. Это приводит к неучету как разлета продуктов взрыва (ПВ) с торцов цилиндрического заряда, так и нерадиальности движения ПВ, а следовательно, к некоторому завышению импульса, действующего от ПВ на внутреннюю трубу камеры [7].

Исследовалось нагружение цилиндрических камер, геометрические размеры которых приведены на рис. 1, при подрыве зарядов с погонной массой $\mu_{ВВ} = 2,01; 3,10; 4,06$ кг/м. Значения остаточных деформаций

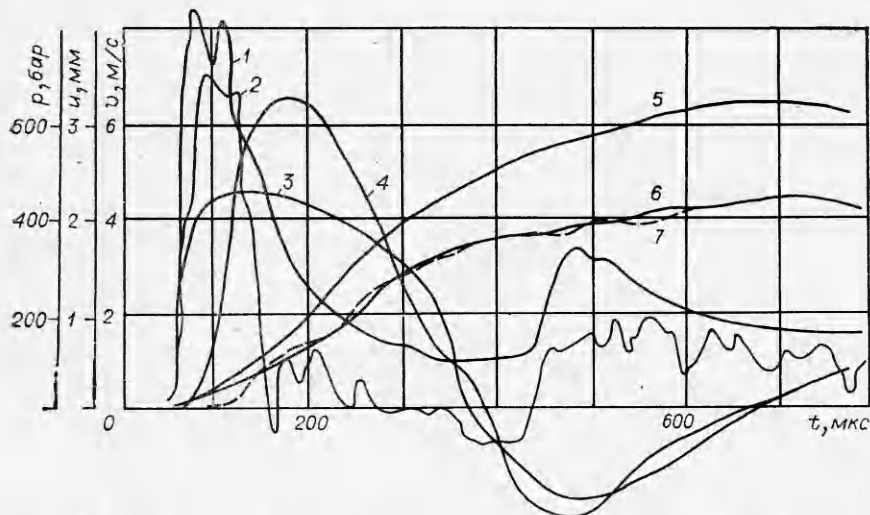


Рис. 4. Результаты расчета реакции камеры при подрыве заряда с $\mu_{\text{ВВ}} = 3,1$ кг/м.

1, 2 — давление, действующее на внутреннюю трубу и на бетон со стороны внутренней трубы соответственно; 3, 4 — скорости внутренней и наружной труб и 5, 6 — их смещение при $\sigma_{\text{В}} = 1,5 \cdot 10^7$ кг/(м·с²), 7 — при $\sigma_{\text{В}} = 1,5 \cdot 10^8$ кг/(м·с²).

наружной стенки камеры для первых двух вариантов нанесены на рис. 3 и находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментом. При расчете варианта с $\mu_{\text{ВВ}} = 4,06$ кг/м получены условия, означающие разрушение камеры, что также согласуется с экспериментальными данными; разрушение первой камеры (образца) произошло при $\mu_{\text{ВВ}} = 3,7$ кг/м, а второй — при $\mu_{\text{ВВ}} = 4,3$ кг/м. Отметим некоторые результаты, полученные из анализа расчетных данных.

1. Коэффициент отражения импульса K (отношение удельного импульса $I_{\text{отр}}$, сообщаемого стенке камеры до второго удара ПВ (рис. 4), к величине импульса в падающих продуктах взрыва $I_{\text{пад}}$) не более чем на 10% отличается от значения $K = 2$.

2. Расчет $I_{\text{отр}}$ по формуле из [1]

$$I_{\text{отр}} = K \cdot 16/27 \cdot \mu_{\text{ВВ}} \sqrt{Q} / \pi R_1 \quad (1)$$

с $K = 2$ (Q — калорийность ВВ) соответствует результатам численного расчета (отличие не превосходит ~6% $I_{\text{отр}}$).

3. Большая часть импульса $0,9 I_{\text{отр}}$ (без учета второго удара ПВ) сообщается стенке камеры за время $t \approx 200$ мкс, что существенно меньше периода собственных колебаний камеры, который составляет $T = 600 \div 700$ мкс.

4. Отмеченное в эксперименте равенство смещений внутренней и внешней труб камеры ($u_1 \approx u_2$) подтверждено численным расчетом: при деформировании слоя бетона образуются радиальные трещины, а его толщина остается практически неизменной (см. рис. 4, 7). При искусственном повышении предела прочности бетона на порядок (до $\sigma_{\text{В}} = 1,5 \cdot 10^7$ кг/(м·с²)) смещение внутренней и наружной труб (см. рис. 4, 5) с хорошей точностью подчинялось соотношению $u_1 \approx R_2/R_1 \cdot u_2 \approx 1,4u_2$, вытекающему из условия сплошности материала.

5. Внутренняя обечайка существенно снижает давление, действующее на бетон (см. рис. 4).

Оценка несущей способности трехслойных камер

Рассматривая движение элемента наружной трубы с присоединенной к нему массой бетона под воздействием давления $p_1(t)$ со стороны внутренней трубы и предполагая на основе экспериментальных и чис-

ленных исследований, что 1) прочность бетона при растягивающих нагрузках равна нулю, 2) радиальные смещения внутренней и наружной труб равны по абсолютной величине, 3) вторичные удары ПВ несущественны по своему вкладу в ее конечную деформацию, можно записать следующее уравнение [6].

$$\ddot{u} - \omega^2 u = A p_1(t),$$

где
$$\omega^2 = \frac{2\pi E \delta_2}{(1 - \nu^2) R_2^2} \cdot \frac{1}{\mu}; \quad A = 2\pi R_1 / \mu; \quad \mu = \mu_3 + \mu_2;$$

$$p_1(t) = p(t) - \frac{E \delta_1 u}{(1 - \nu^2) R_1^2} - \frac{\mu_1 \ddot{u}}{2\pi R_1}; \quad p(t) - \text{давление, действующее на внут-}$$

реннюю трубу со стороны ПВ; ρ , E — плотность и модуль Юнга материалов; μ_i — погонные массы отдельных слоев камеры. Индексы: 1 — внутренняя труба, 2 — наружная труба, 3 — бетон.

Решение полученного уравнения

$$u = \frac{A}{\omega} \sin \omega t \int_0^t p_1(\tau) \cos \omega \tau d\tau - \frac{A}{\omega} \cos \omega t \int_0^t p_1(\tau) \sin \omega \tau d\tau. \quad (2)$$

Учитывая, что при взрывном нагружении $p_1(t)$ со временем уменьшается, положим, аналогично [6], $\cos \omega t = 1$, $\sin \omega t = 0 (t < \pi/\omega - = 0,5 T)$ и введем замену $y = \int_0^t u dt$. Тогда из (2) следует

$$\mu_1 \ddot{y} + \mu \cdot \omega / \sin \omega t \cdot \dot{y} + 2\pi E \delta_1 / (1 - \nu^2) R_1 \cdot y = 2\pi R_1 I(t),$$

где $I(t) = \int p(t) dt$ — импульс, сообщаемый внутренней поверхности камеры. Последнее уравнение можно упростить, рассматривая его применительно к условиям эксперимента. В этом случае первый член в левой части уравнения мал по сравнению с остальными из-за малой массы внутренней трубы. Пренебрегая им, получим $\dot{y} + A_1 \sin \omega t y = B y(t) \sin \omega t$, $A_1 = 2\pi E \delta_1 / (1 - \nu^2) R_1 \omega \mu$, $B = 2\pi R_1 / \mu \omega$. Положим теперь, что импульс сообщается стенке мгновенно. Тогда $I(t) = I_{отр}$, а решение уравнения — $y = I_{отр} B / A_1 + C e^{A_1 / \omega \cdot \cos \omega t}$. Коэффициент C определяется из условия $y = 0$ при $t = 0$. Тогда

$$u = \dot{y} = \frac{2\pi R_1 I_{отр}}{\mu \omega} \sin \omega t \cdot e^{\delta_1 / \delta_2 \cdot R_2 / R_1 \cdot (\cos \omega t - 1)}. \quad (3)$$

Время t_{max} достижения максимального смещения u_{max} определяется из условия $\dot{u} = 0$ уравнением

$$\cos \omega t_{max} = \frac{1}{2} \left(-\frac{\delta_2 R_1}{\delta_1 R_2} + \sqrt{\left(\frac{\delta_2 R_1}{\delta_1 R_2}\right)^2 + 4} \right), \quad \ddot{u}_{max} = \frac{\sigma_T R_2 (1 - \nu^2)}{E}.$$

Подставляя (1) в (3), получим

$$\mu_{ВВ} = \frac{27}{32} \frac{u_{max} \pi R_1 \omega}{A \sqrt{Q} \sin \omega t_{max}} e^{\frac{\delta_1 R_1}{\delta_2 R_2} (1 - \cos \omega t_{max})}. \quad (4)$$

Эта формула определяет максимальную допустимую погонную массу цилиндрического заряда ВВ для конкретной камеры из условий работы на пределе текучести наружной трубы. Расчет по соотношению (4) для условий проведенного эксперимента дает значение $\mu_{ВВ} = 1,6$ кг/м, что близко к экспериментальному результату $\mu_{ВВ} = 2,0 \div 2,5$ кг/м (возможное проявление эффекта Баушингера не изменит существенно этот вывод).

Из анализа полученных уравнений следует, что вклад бетона в несущую способность определяется коэффициентом $\eta = \sqrt{1 + \mu_1/\mu_2}$, который для испытанных камер равен $\eta = 2$. Это также согласуется с экспериментом, так как бетон удвоил допустимую только для одних труб нагрузку (см. рис. 3).

Выводы

Проведено экспериментальное и численное исследование реакции трехслойных взрывных камер на внутреннее взрывное нагружение. Показано, что использование бетона в качестве промежуточного слоя может существенно повысить несущую способность камер за счет увеличения инертной массы конструкции. Отмечено своеобразие деформирования слоя бетона, заключающееся в образовании блоков с неизменной толщиной, равной начальной, движущихся относительно друг друга. Предложен метод оценки несущей способности камер, аналогичных испытанным.

Поступила в редакцию 22/VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
2. В. А. Баталов, В. А. Свидицкий и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Методики и программы численного решения задач математической физики, 1978, 1, 1.
3. М. Л. Уилкинс.— В сб.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
4. В. А. Быченков, В. В. Гаджиева, В. Ф. Курапатенко.— В сб.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 3, № 2. Новосибирск, 1972.
5. В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин, М. В. Жерноклетов. ПМТФ, 1969, 4.
6. А. Ф. Демчук. ПМТФ, 1968, 5.
7. В. В. Адищев, Л. А. Талзи.— В сб.: Тр. XII Всес. конф. по теории оболочек и пластин. Ереван, 1980.

О КРИТЕРИИ ПРИМЕНИМОСТИ ЛИНЕЙНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ О РАЗВИТИИ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГАЗОДИНАМИКЕ

Е. Е. Мешков, В. Н. Мохов
(Москва)

Задачи устойчивости и развития малых возмущений в газодинамике обычно исследуются при помощи решения (аналитического или численного) линеаризованных уравнений. Начальное возмущение в таких случаях часто задается в виде $y = a_0 \cos kx$ и решается как $y = a(t) \cos kx$, где $a(t)$ — некоторая газодинамическая величина. При этом применимость линейного приближения обычно определяется малостью возмущения и, в частности, если $a(t)$ имеет размерность длины,

$$a(t)k \ll 1. \quad (1)$$

Однако в ряде случаев линейное приближение оказывается неверным даже в случае выполнения соотношения (1). Это можно показать при помощи теоретических оценок и экспериментов.

1. Рассмотрим плоскую задачу, в которой искривленная по синусоиде характеристическая поверхность (например, фронт волны разрежения или очень слабая ударная волна) движется по веществу с постоянной скоростью. В этом случае изменение формы поверхности со временем определяется известным принципом Гюйгенса [1] и, если в начальный