

лярном оси заряда, хотя и превышает аналогичный параметр в направлении торца заряда, но все же значительно уступает длине волны по направлению действия газокумулятивной струи. Эта особенность действия газокумулятивного заряда достаточно устойчива (доверительные интервалы анализируемых зависимостей, составляющие  $\pm 11,4\%$  измеряемой величины при доверительной вероятности 0,9 и показанные на рис. 4 отрезками на концах прямых  $t_+(r)$ , не пересекаются для разных направлений излучения взрывных волн) и, по-видимому, свидетельствует о том, что газокумулятивная струя создает дополнительный подпор взрывной волне не только по амплитуде, но и во времени.

Аналогично  $t_0(r)$  и  $t_{\max}(r)$ , зависимость  $t_+(r)$  удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией вида  $t_+ = a_+(r/r_3 - 1)$ , однако в этом случае экспериментальные коэффициенты  $a_+$  для разных направлений распространения волн различны. Их численные значения для условий проведения экспериментов даны в табл. 2.

На основании изложенного можно сделать вывод, что повышение эффективности механического действия газокумулятивного заряда обусловлено перераспределением энергии взрыва, отражающимся на формировании напряженного состояния окружающей среды: увеличении амплитуды взрывной волны, излучаемой в направлении истечения газокумулятивной струи, и длительности действия избыточного давления. Оба эти фактора способствуют усилению как уплотняющего (в грунтах), так и разрушающего (в скальных горных породах) действия взрыва, что может быть применено при совершенствовании технологий использования энергии взрыва в горной промышленности и других отраслях народного хозяйства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мерзиевский Л. А., Титов В. М., Фадеев Ю. И. и др. Высокоскоростное метание твердых тел // ФГВ.— 1987.— 23, № 5.— С. 77.
2. Михалюк А. В., Писарев Ю. А. Механическое действие газокумулятивных зарядов в горных породах // Там же.— 1989.— 25, № 5.— С. 123.
3. Евстропов Н. А. Взрывные работы в строительстве.— М.: Стройиздат, 1965.
4. Вовк А. А., Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок.— Киев: Наук. думка, 1984.
5. Туричин А. М., Новицкий П. В. Проволочные преобразователи и их техническое применение.— М.: Энергоиздат, 1987.
6. Ляхов Г. М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах.— М.: Наука, 1982.
7. Действие крупномасштабных взрывов в массиве горных пород/Под ред. А. Н. Щербаня.— Киев: Наук. думка, 1974.— Ч. 1.

2. Киев

Поступила в редакцию 14/V 1990

УДК 620.178.7

*Е. Ф. Горбунов, А. Г. Иванов, В. А. Могилев, А. А. Пехтерев,  
А. Т. Плохин, А. А. Сиротов, В. Н. Софронов, Ю. И. Файков, Ю. А. Фатеев*

#### РЕАКЦИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАМЕР НА ВНУТРЕННЕЕ ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ

В работе [1] показан существенный вклад массы бетона в несущую способность трехслойной взрывной камеры, когда бетон располагался между двумя цилиндрическими стальными обечайками. В настоящей работе приведены результаты экспериментального и численного изучения реакции взрывных камер, у которых бетон заполняет арматурный каркас стенки. Показана высокая стойкость бетона внутри арматурного каркаса к ударно-волновому нагружению, его существенный вклад в несущую способность взрывной камеры. Предложен метод оценки несущей способности камер, аналогичных испытанным.

## Эксперимент

Взрывные камеры (рис. 1) состоят из внутренней обечайки, покрытой слоем железобетона, арматурный каркас которого представлял из себя слой продольной, кольцевой (12 слоев) и радиальной арматуры, соединенных между собой сваркой. Основные характеристики камер представлены в табл. 1—3. Каркас изготовлен из арматуры класса АШ диаметром 8 мм (камеры 1—5) и 12 мм (камера 6). Камеры 1—4, 6 заливались цементно-песчаным водным раствором без щебеночного заполнителя (бетон марки 100), камера 5 — бетоном марки 200. В камере 5 у одной из боковых наружных поверхностей поставлена противоткольная сетка с размером ячейки 30×30 мм. В процессе заливки камеры 5 выяснилось, что из-за малого размера ячеек арматурного каркаса в железобетонном массиве образуются воздушные полости. Внутренняя обечайка камер состояла из четырех секций, стыки между которыми не заваривались, а закрывались стальной лентой, привариваемой к внутренней поверхности обечайки. Нагружение камер осуществлялось подрывом соосно устанавливаемых зарядов ВВ.

Методика испытаний камер заключалась в следующем: камеры 1, 4, 5 постепенным увеличением от опыта к опыту погонной массы заряда доводились до разрушения или заметных остаточных деформаций. Камера 2 испытывалась в двадцати опытах при постоянной нагрузке, близкой к предельно допустимой, определенной по результатам испытаний камер 1, 4. Под предельно допустимой понималась такая нагрузка (или такая погонная масса заряда ВВ —  $\mu_{ВВ}^*$ ), которая еще не приводила к появлению остаточных деформаций стенки камеры. Камера 3 служила для определения давления, действующего на ее внутреннюю поверхность, и реакции стенки на взрывное нагружение.

В опытах регистрировались параметры остаточной деформации внутренней обечайки камер, для чего до и после проведения каждого опыта микронутромером измерялся внутренний диаметр обечайки в 10 сечениях, равномерно расположенных по длине камер. В каждом сечении измерялись два взаимноперпендикулярных диаметра. Специальные многократные промеры показали, что среднеквадратичная погрешность отдельных измерения составляет  $S = 0,3$  мм. Определялись давления, действующие на внутреннюю поверхность камеры 3. С этой целью в центральном сечении камеры устанавливался пьезодатчик давления, который тарировался на пневматической ударной трубе;  $S \approx 3\%$ . Для измерения перегрузки, возникающей в стенке камеры, в центральном сечении камеры 3, с двух противоположных сторон в железобетон на глубину 220 мм вставлены стержни из сплава АМГ6, на торцевой наружной поверхности которых устанавливались пьезоакселерометры типа 8309 фирмы Брюль и Кьер (Дания);  $S \approx 5\%$ .

Режим нагружений камер 1, 2, 4, 5 и соответствующее приращение внутреннего диаметра  $\Delta D = D - D_0$  ( $D_0$  — начальный диаметр в сечении, отстоящем на  $0,7L_{ВВ}$  от инициируемого торца заряда), где наблюдались максимальные деформации (а согласно [2], и максимальные значения удельного импульса нагружения), приведены в табл. 4 (среднее по измерениям двух диаметров значение  $\Delta D$ ).

В камере 3 проведено 5 опытов с погонной массой зарядов  $\mu_{ВВ} = 4,8$  и  $5,6$  кг/м. Типичный вид полученных в опытах на этой камере осциллограмм давления  $p(t)$  и перегрузки  $n(t)$  показан на рис. 2, а результаты их обработки содержатся в табл. 5. Прослеживающееся на зависимостях  $p(t)$  возмущение с частотой  $\omega \approx 50$  кГц, вероятно, соответствует собственной частоте колебаний датчика, закрепленного на стенке камеры.

Отметим ряд эффектов, обнаруженных в эксперименте.

1. Во всем исследуемом диапазоне реализуется динамический характер нагружения камер, поскольку длительность положительной фа-

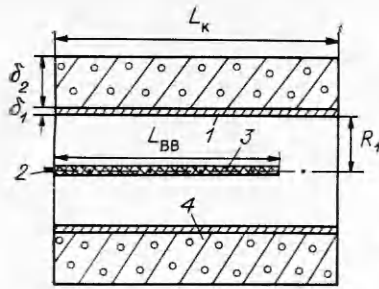


Рис. 1. Схема камеры.

1 — внутренняя стальная обечайка; 2 — капсуль-детонатор; 3 — цилиндрический заряд ВВ; 4 — слой железобетона.

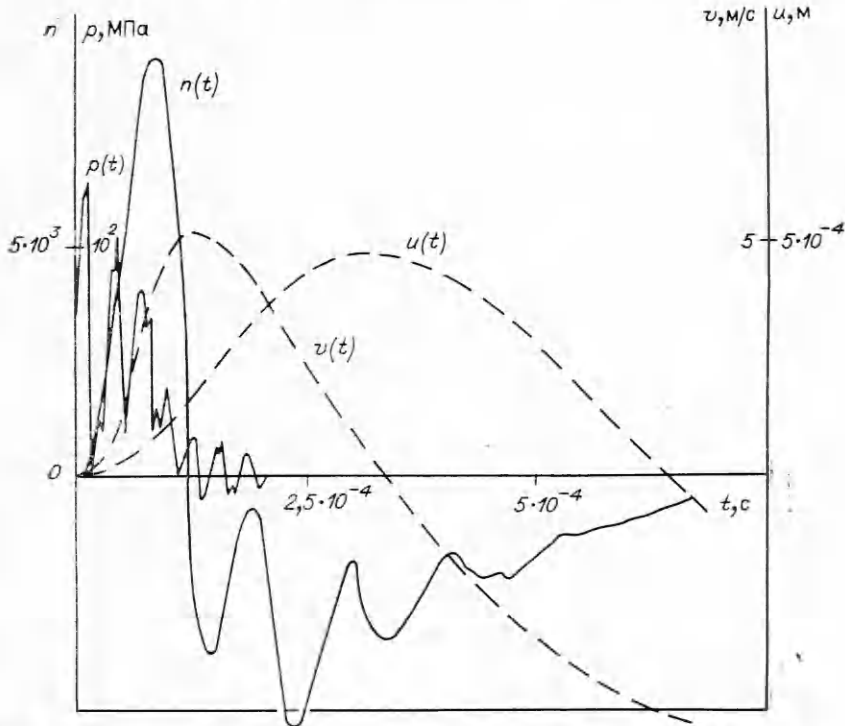


Рис. 2. Зависимости  $p(t)$  и  $n(t)$ , зарегистрированные в опыте 3 (табл. 5); кривые  $v(t)$  и  $u(t)$  получены интегрированием экспериментальной линии  $n(t)$ .

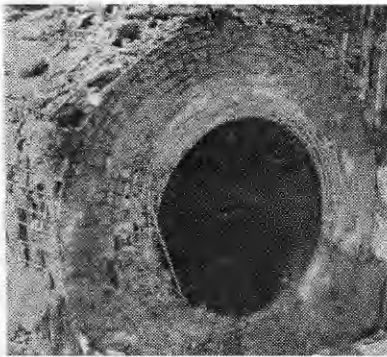


Рис. 3. Внешний вид камеры 4 после испытаний.

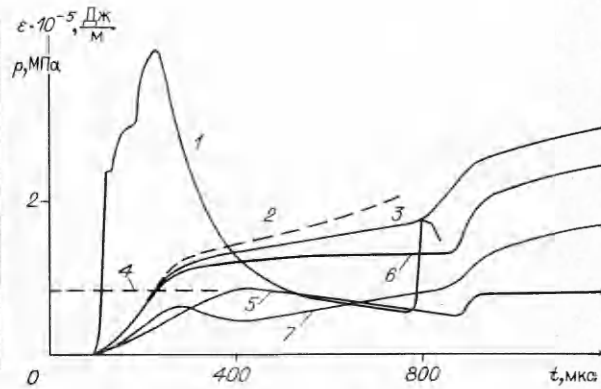


Рис. 4. Отбор энергии стенкой камеры 1 при мгновенном подрыве в ней заряда ВВ с  $\mu_{ВВ} = 6,6$  кг/м.

1 —  $p(t)$ ; 2 — энергия стенки с разрушенной обечайкой; 3 — общая энергия стенки (железобетон и обечайка); 4 — расчет по формуле (2); 5, 7, 6 — кинетическая, потенциальная и общая энергия железобетона.

Таблица 1

## Основные характеристики камер

| Характеристика             | Единицы измерения | Номер камеры     |                  |                  |                  |                  |                  |
|----------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                            |                   | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                |
| $R_1$                      | м                 | 0,6              | 0,6              | 0,6              | 0,6              | 0,6              | 1,0              |
| $\delta_1 \cdot 10^3$      | м                 | 6                | 6                | 12               | 12               | 12               | 10               |
| $\delta_2$                 | м                 | 0,6              | 0,6              | 0,6              | 0,6              | 0,6              | 1,0              |
| $L_{\kappa}$               | м                 | 3                | 3                | 3                | 3                | 3                | 5                |
| $L_{\text{ВВ}}$            | м                 | 2,4              | 2,4              | 2,4              | 2,4              | 2,4              | 4                |
| $F_{\text{ка}} \cdot 10^2$ | м <sup>2</sup> /м | 1,25             | 1,25             | 1,25             | 1,25             | 1,25             | 1,55             |
| $F_a \cdot 10^2$           | м                 | 4,8              | 4,8              | 4,8              | 4,8              | 4,8              | 4,4              |
| $\Delta \cdot 10^2$        | м                 | 7,5              | 7,5              | 7,5              | 7,5              | 7,5              | 8,3              |
| $\mu_a$                    | кг/м              | 560              | 560              | 560              | 560              | 560              | 1200             |
| $\mu_{\text{ка}}$          | кг/м              | 880              | 880              | 880              | 880              | 880              | 1800             |
| $\mu_{\text{жб}}$          | кг/м              | $7,8 \cdot 10^3$ | $7,8 \cdot 10^3$ | $7,8 \cdot 10^3$ | $7,8 \cdot 10^3$ | $7,8 \cdot 10^3$ | $2,0 \cdot 10^4$ |

Примечание.  $\mu_{\text{ка}}$ ,  $\mu_a$ ,  $\mu_{\text{жб}}$  — погонные массы (на единицу длины камеры) кольцевой арматуры, всей арматуры и общей массы железобетона соответственно;  $\Delta$  — расстояние между слоями радиальной арматуры.

Таблица 2

## Распределение массы кольцевой арматуры по слоям

| Номер слоя | Камеры 1–5 |                | Камера 6  |                |
|------------|------------|----------------|-----------|----------------|
|            | $R_i$ , м  | $\mu_i$ , кг/м | $R_i$ , м | $\mu_i$ , кг/м |
| 1          | 0,65       | 33,6           | 1,08      | 66,1           |
| 2          | 0,69       | 35,7           | 1,14      | 70,2           |
| 3          | 0,73       | 37,8           | 1,21      | 74,2           |
| 4          | 0,77       | 39,9           | 1,28      | 78,3           |
| 5          | 0,81       | 42,8           | 1,35      | 83,0           |
| 6          | 0,86       | 44,9           | 1,42      | 87,4           |
| 7          | 0,91       | 47,8           | 1,51      | 92,8           |
| 8          | 0,96       | 50,3           | 1,60      | 97,7           |
| 9          | 1,01       | 52,9           | 1,68      | 103,2          |
| 10         | 1,06       | 55,3           | 1,75      | 107,5          |
| 11         | 1,11       | 58,2           | 1,84      | 112,8          |
| 12         | 1,17       | 61,1           | 1,93      | 118,2          |

Таблица 3

## Механические характеристики материалов

| Элемент камеры   | Материалы | $\sigma_{\text{т}}$ ,<br>кг/(м·с <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\text{т}}$ ,<br>0,2 кг/(м·с <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\text{в}}$ ,<br>кг/(м·с <sup>2</sup> ) | $\epsilon_{\text{р}}$ , % | $E$ ,<br>кг/(м·с <sup>2</sup> ) | $\nu$ | $E_{\text{с}}$ ,<br>кг/(м·с <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\text{в, с}}$ ,<br>кг/(м·с <sup>2</sup> ) |
|------------------|-----------|---|---|---|---------------------------|---------------------------------|-------|--|--|
|                  |           | $5 \cdot 10^8$                                  | $4 \cdot 10^8$                                      | $8,4 \cdot 10^8$                                |                           |                                 |       |  |  |
| Внутренняя труба | Сталь     | $5 \cdot 10^8$                                  | $7,5 \cdot 10^8$                                    | $8,4 \cdot 10^8$                                | 10                        | $2,1 \cdot 10^{11}$             | 0,28  | —  | —  |
| Арматура Бетон   | Ст. АШ    | $4 \cdot 10^8$                                  | $4 \cdot 10^8$                                      | $6 \cdot 10^8$                                  | 14                        | $2,1 \cdot 10^{11}$             | 0,28  | —  | —  |
|                  | Марка 100 | —   | —   | $10^8$  | $10^{-2}$                 | $2 \cdot 10^{10}$               | 0,15  | $2,9 \cdot 10^{10}$                        | $10^7$   |
| »                | Марка 200 | —   | —   | $1,5 \cdot 10^8$                                | $10^{-2}$                 | $2 \cdot 10^{10}$               | 0,15  | $2,9 \cdot 10^{10}$                        | $1,5 \cdot 10^7$                                   |

Режимы нагружения и остаточная деформация внутренней обечайки камер

| Номер опыта | Камера     |         |            |         |            |                    |            |         |
|-------------|------------|---------|------------|---------|------------|--------------------|------------|---------|
|             | 1          |         | 4          |         | 5          |                    | 6          |         |
|             | $\mu_{ВВ}$ | $D-D_0$ | $\mu_{ВВ}$ | $D-D_0$ | $\mu_{ВВ}$ | $D-D_0$            | $\mu_{ВВ}$ | $D-D_0$ |
| 1           | 3,0        | 0       | 1,1        | 0       | 3,0        | 1                  | 7,5        | 0,5     |
| 2           | 3,4        | 0       | 2,1        | 0       | 3,4        | 1                  | 8,6        | 0,5     |
| 3           | 3,8        | 0       | 3,0        | 0       | 3,8        | 1                  | 9,6        | 0,5     |
| 4           | 4,3        | 0       | 3,4        | 0       | 4,3        | 2                  | 10,8       | 0,5     |
| 5           | 4,8        | 0       | 3,8        | 0       | 4,8        | 3                  | 12,1       | 0,5     |
| 6           | 5,6        | 0       | 4,3        | 0       | 5,6        | 4                  | 13,4       | 1,0     |
| 7           | 6,6        | 0,5     | 4,8        | 0       | 5,6        | 6                  | 15,0       | 1,0     |
| 8           | 7,5        | 1,5     | 5,6        | 0       | 5,6        | 8                  | 16,9       | 2       |
| 9           | 8,5        | 2,5     | 5,6        | 0,5     | 6,6        | 10                 | —          | 3       |
| 10          | 8,5        | 3,5     | 5,6        | 1,0     | 6,6        | 12                 | 18,4       | —       |
| 11          | 8,5        | 4,0     | 6,6        | 1,5     | 6,6        | 14                 | —          | —       |
| 12          | 9,6        | 5,5     | 6,6        | 2,0     | 7,5        | 18                 | —          | —       |
| 13          | 9,6        | 8       | 6,6        | 2,5     | 7,5        | Обечайка разрушена | —          | —       |
| 14          | 9,6        | 10      | 7,5        | 3,5     | 7,5        | —                  | —          | —       |
| 15          | 10,8       | 15      | 7,5        | 4,5     | —          | —                  | —          | —       |

Примечание.  $\mu_{ВВ}$  в кг/м,  $D - D_0$  в м.

Таблица 5

Результаты обработки осциллограмм, полученных в опытах на камере 3

| Параметры  | Единица измерения | Номер опыта         |                     |      |      |      |
|------------|-------------------|---------------------|---------------------|------|------|------|
|            |                   | 1                   | 2                   | 3    | 4    | 5    |
| $\mu_{ВВ}$ | кг/м              | 3,35                | 3,35                | 3,35 | 5,65 | 5,65 |
| $t_+$      | мкс               | 108                 | 125                 | 105  | 125  | 100  |
| $T^*$      | мкс               | 100                 | 85                  | 100  | 85   | 130  |
| $u^*$      | мм                | 900                 | 1250                | 1100 | —    | —    |
| $I_{отр}$  | кг/(м·с)          | —                   | 900                 | 1300 | —    | —    |
|            |                   | 0,3                 | 0,6                 | 0,4  | 1,1  | —    |
|            |                   | —                   | 0,2                 | 0,5  | 1,0  | —    |
|            |                   | $\sim 6 \cdot 10^3$ | $\sim 6 \cdot 10^3$ | —    | —    | —    |

\*  $T$  — период собственных колебаний камеры.

зы давления  $t_+ < T$  (см. табл. 5) и слабо зависит от  $\mu_{ВВ}$  для условий проведенных опытов [3]:  $t_+ \sim \sqrt{\mu_{ВВ}}$ .

2. При нагрузках, не вызывающих остаточных деформаций внутренней обечайки, откалывается слой бетона, находящийся вне арматурного каркаса, и происходит локальный отрыв стальных лент, прикрывающих стыки между отдельными секциями обечайки.

3. При нагрузках, приводящих к пластическим деформациям внутренней обечайки, начинается выброс бетона из наружных слоев арматурного каркаса и отрыв обечайки от радиальной арматуры, т. е. начинает разрушаться взрывная камера.

4. Бетон низкой марки проявляет высокую стойкость к ударно-волновому нагружению. Так, даже при нагрузках, приведших к полному разрушению внутренней обечайки, внутренние слои бетона сохранили сплошность без образования видимых трещин. Рассмотрим особенности деформирования и разрушения отдельных камер.

**Камера 1.** Видимый отрыв обечайки от каркаса начался в опыте 10, а затем увеличивался от опыта к опыту. При этом происходило ее разрушение из-за образования трещин как по сварным швам, так и в материале секций. После опыта 18 отмечены разрывы кольцевой арматуры у наружной поверхности.

**Камера 2** испытывалась при циклической нагрузке, равной  $\mu_{\text{вв}} = 4,8$  кг/м, которая определена по результатам испытаний камеры 1 как предельно допустимая для длительной эксплуатации. Остаточная деформация внутренней обечайки не превысила после 23 опытов  $e_0 = 0,17$  %. В опыте 20 вдоль образующей обечайки возникла волосяная трещина длиной 10 мм. В последующих опытах трещина не увеличивалась, а ее наличие не привело к возрастанию деформаций.

**В камере 4** характер деформирования и разрушения соответствовал результатам, полученным для камеры 1. Внешний вид камеры после испытаний показан на рис. 3.

**В камере 5** проведено 14 опытов, после которых в ее стенке образовалось сквозное отверстие. При разрушении камеры выявилось большое количество пустот в железобетонном массиве, что привело к пластической деформации обечайки в первом же опыте. Наличие с одной из сторон камеры противоточной сетки не изменило характера отколов бетона.

### Численный расчет реакции камер

Характер деформации взрывной камеры исследовался численно на ЭВМ БЭСМ-6. Для расчетов камеры представлялись в виде двухслойной бесконечной вакуумированной трубы, первый слой которой соответствовал обечайке ( $\delta_1 = 6$  мм), второй — железобетонному покрытию ( $\delta_2 = 600$  мм). При этом его характеристики определены с некоторыми допущениями.

При окружной деформации нагрузка воспринимается только кольцевой арматурой, поскольку бетон обладает невысокой прочностью на разрыв и малой предельной растяжимостью. С учетом этого запишем условные характеристики железобетона на растяжение [4]:

$$\sigma_T^* = \frac{F_{\text{ка}}}{F_0} (\sigma_T)_{\text{ка}}, \quad \sigma_B^* = \frac{F_{\text{кк}}}{F_0} (\sigma_B)_{\text{ка}}, \quad E^* = \frac{F_{\text{ка}}}{F_0} E_{\text{ка}}, \quad \nu^* = \nu_B,$$

где  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $E$ ,  $\nu$  — предел текучести, временный предел прочности, модуль Юнга, коэффициент Пуассона;  $F_0$  — площадь сечения железобетона плоскостью, включающей в себя ось камеры. Здесь и далее а — арматура; ка — кольцевая арматура; ра — радиальная арматура; жб — железобетон; б — бетон.

При сжатии железобетон ведет себя упруго независимо от уровня нагружения, а связь между напряжением и деформацией подчиняется уравнению  $\sigma = E_c^* e$ . Модуль Юнга при сжатии определяется по правилу смешивания характеристик [4]:

$$E_c^* = \frac{V_a}{V_{\text{жб}}} E_a + \frac{V_b}{V_{\text{жб}}} E_b,$$

$V_a/V_{\text{жб}}$ ,  $V_b/V_{\text{жб}}$  — коэффициенты объемного заполнения железобетона арматурой и бетоном.

Прочность на растяжение контактной границы обечайка — железобетон вычисляется по формуле  $\sigma_{\text{гп}} = F_{\text{ра}} \sigma_B$  ( $\sigma_B$  — прочность на разрыв арматурной стали,  $F_{\text{ра}}$  — общая площадь поперечного сечения радиальной арматуры, приходящаяся на единицу площади обечайки).

Результаты вычислений по приведенным формулам дали следующие результаты:  $\sigma_1^* = 1,2 \cdot 10^7$  кг/(м·с<sup>2</sup>),  $\sigma_1^* = 8,3 \cdot 10^6$  кг/(м·с<sup>2</sup>),  $E^* = 4,2 \cdot 10^9$  кг/(м·с<sup>2</sup>),  $\nu^* = 0,15$ ,  $E_c^* = 3,5 \cdot 10^{10}$  кг/(м·с<sup>2</sup>),  $\sigma_{\text{гп}} = 7,8 \cdot 10^6$  кг/(м·с<sup>2</sup>). Уравнение состояния стали и железобетонного покрытия с учетом слабобой интенсивности ударных волн бралось в упругой области деформирования:  $p = \rho_0 c_0^2 \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)$ . Для стали и железобетона получено  $\rho_0 = 7,85$  и  $2,3$  г/см<sup>3</sup>,  $c_0 = 4,6 \cdot 10^3$  и  $2,7 \cdot 10^3$  м/с.

В расчетах задавалась мгновенная детонация ВВ с калорийностью  $Q = 1240$  ккал/кг. Использовались программы, предназначенные для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движение упругопластических сред в одномерном приближении [5]. Программы, близкие по своим возможностям, описаны в [6, 7]. Удельный импульс, сообщаемый стенке, вычисляли по формуле из [2]:

$$I_{\text{отр}} = K \frac{16 \mu_{\text{ВВ}} V \bar{Q}}{27 \pi R_1} \quad (1)$$

( $K = 2$  — коэффициент отражения), а также интегрированием расчетной зависимости  $p(t)$  (рис. 4) до момента времени, соответствующего второму удару ПВ. Полученные значения отличаются не более чем на 15%. Расчет по формуле (1) с  $\mu_{\text{ВВ}} = 3,35$  кг/м дает  $I_{\text{отр}} \approx 5 \cdot 10^3$  кг/мс, что соответствует величине, измеренной в камере З ( $I_{\text{отр}} \approx 6 \cdot 10^3$  кг/м · с).

Основной отбор энергии стенкой железобетонной ВК происходит за время  $t \approx 150$  мкс (см. рис. 4), равное времени прохода ударной волны по стенке ВК. В дальнейшем (до второго нагружения стенки продуктами взрыва) железобетон движется практически по инерции ( $\varepsilon_k + \varepsilon_n = \text{const}$ ;  $\varepsilon_k$ ,  $\varepsilon_n$  — кинетическая и потенциальная энергия). Давление, действующее в это время на стенку, практически полностью компенсируется напряжениями, возникающими в обечайке. По расчету второй удар ПВ существенно увеличивает энергию ВК, однако в проведенных экспериментах он не зарегистрирован, что, по-видимому, происходит из-за бокового разлета ПВ и отражения продуктов на оси трубы друг от друга не по нормали. Внутренняя обечайка камер играет незначительную роль в общей несущей способности, что следует из рис. 4, где штриховой кривой показан отбор энергии стенкой при разрушенной обечайке.

Расчет энергии, отбираемой стенкой камеры на единице ее длины от энергии взрыва

$$\varepsilon = \int_0^{2\pi R_1} \frac{I_{\text{отр}}^2}{2M_{\text{уд}}} dS = \left( \frac{64}{27} \right)^2 \frac{\mu_{\text{ВВ}} Q}{2\mu_{\text{жб}}} \quad (2)$$

(с учетом формулы (1) и  $M_{\text{уд}} = \frac{\mu_{\text{жб}}}{2\pi R_1}$ ), показывает, что она может быть использована в оценочных вычислениях.

### Оценка несущей способности железобетонных камер

Рассмотрим модель реакции взрывной камеры на динамическое нагружение, основанную на экспериментальных и расчетных данных настоящей работы, а также на результатах работы [1].

Железобетонный массив камеры состоит из концентрических обечайек, радиусы и погонные массы которых равны радиусам и погонным массам соответствующих слоев кольцевой арматуры, жестко соединенных между собой и внутренней обечайкой ВК радиальной арматурой так, что радиальное смещение  $u$  всех обечайек при нагружении равно по абсолютной величине. Пространство между обечайками заполнено бетоном, который не обладает прочностью на растяжение. Энергия, сообщаемая стенке ВК на единице ее длины, определяется формулой (2) и преобразуется полностью в энергию деформации обечайек при достижении ими максимального смещения, которое не выходит за пределы упругости.

С учетом сказанного, окружное напряжение  $i$ -го силового слоя ( $i$ -й обечайки)  $\sigma_i = E\varepsilon_i = Eu_i/R_i$ , откуда следует, что наибольшие напряжения должны возникать во внутренних обечайках, так как  $u_i = \text{const}$ . Исходим из того, что внутренний силовой слой работает на пределе текучести. Тогда  $u = \sigma_{T,1} R_1 / E$ , а относительная деформация  $i$ -го слоя  $\varepsilon_i = u/R_i = \sigma_{T,1} / E (R_1/R_i)$ . Общая энергия деформации всех слоев

Т а б л и ц а 6  
 Предельно допустимая погонная масса заряда ВВ для испытанных камер

| Номер камеры | *<br>μ <sub>ВВ</sub> , кг/м |        |
|--------------|-----------------------------|--------|
|              | Эксперимент                 | Расчет |
| 1            | 5,6                         | 4,3    |
| 2            | 4,8                         | 4,3    |
| 4            | 5,6                         | 5,1    |
| 5            | <3                          | 5,1    |
| 6            | 15                          | 12     |

по (4) с исходными данными из табл. 1—3 приведены в табл. 6.

Не более чем 30%-ное расхождение с экспериментальными результатами следует считать удовлетворительным. Поскольку в (4) μ<sub>жб</sub> ~ μ<sub>б</sub>, то μ<sub>ВВ</sub>\* ~ √μ<sub>б</sub>.

$$\varepsilon = \sum \frac{\sigma_{т,1}^2}{2E\rho_c} = \left(\frac{R_1}{R_i}\right)^2 \mu_i, \quad (3)$$

где μ<sub>i</sub> — погонная масса *i*-го силового слоя; ρ<sub>c</sub> — плотность материала силового слоя (стали). Приравнявая (2) и (3), получим

$$\mu_{ВВ}^* = \frac{27}{64} \sigma_{т,1} \sqrt{\frac{\mu_{жб}}{E\rho_{ст}Q} \sum_i \left(\frac{R_1}{R_i}\right)^2 \mu_i}. \quad (4)$$

Это выражение определяет предельно допустимую погонную массу ВВ, которая не вызовет появления пластических деформаций внутренней обечайки ВК. Результаты вычислений

### Выводы

Проведено экспериментальное и численное исследование реакции железобетонных взрывных камер на внутреннее взрывное нагружение. Показана высокая стойкость бетона внутри арматурного каркаса к ударно-волновому нагружению, его существенный вклад в несущую способность взрывной камеры. Отмечено, что разрушение стенки камер началось при появлении остаточных деформаций внутренней обечайки. Показан импульсный характер нагружения стенки камер в проведенных опытах. Предложен метод оценки несущей способности камер, аналогичных испытанным.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г., Могилев В. А., Сиротов А. А. и др. Реакция трехслойных камер при подрыве в них удлиненных зарядов ВВ // ФГВ.— 1982.— 18, № 4.
2. Баум Ф. А., Орленко Л. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
3. Цикулин М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел.— М.: Наука, 1969.
4. Ахвердов И. Н., Смолянский А. Е., Скочелла В. В. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона.— Минск: Наука и техника, 1973.
5. Баталов В. А., Свидинский В. А. и др. Вопросы атомной науки и техники. Методика и программы численного решения задач математической физики.— 1978.— 1, № 1.
6. Уилкинс М. Л. Расчет упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике.— М.: Мир, 1967.
7. Быченков В. Н., Гаджиева В. В., Куропатенко В. Ф. Расчет неустановившихся движений разрушаемых сред // ЧММСС.— 1972.— № 2.

г. Арзамас

Поступила в редакцию 3/VII 1990

УДК 662.215.12

А. И. Лямкин, С. Т. Попов

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗЛЕТА ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ СПЛАВОВ ТГ В ВАКУУМ

Экспериментально исследовался разлет продуктов детонации сплавов ТГ в вакуум в электрическом поле. Данные опытов указывают на электронную природу сигналов. Электроны появляются за счет термоэмиссий с горячих частиц углерода, ионизации продуктов детонации и остаточных газов. Разлетающиеся продукты детонации интенсивно эмиттируют электроны в течение 0,6—0,8 мкс. На интенсивность спада сигналов влияют скорости разлета продуктов детонации и соответствующего охлаждения, а также фазовый состав конденсированных продуктов детонации.