

Таблица 2.8. Сравнение свойств алмазов типа ДАГ и ДАС

Параметр	ДАГ	ДАС
Массовое содержание летучих при нагреве в вакууме до 1000 °С, %	2–4	2–4
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	20–25	35
Содержание лонсдейлита, %	10–20	0
Размеры ОКР, нм	7–8	18–20
Размер частиц под электронным микроскопом, нм	10–50	20–80

Мелкие частицы графита успевают прогреться в детонационной волне и дают округлые зерна (подобно частицам ДАС) по диффузионному механизму. Более крупные зерна, содержащие лонсдейлит, сохраняют признаки слоистого строения графита и, по-видимому, возникали при более низких температурах по мартенситному механизму.

## Глава третья

### ВЗРЫВНЫЕ КАМЕРЫ

#### 3.1. Общее описание камер

Во всех случаях взрывная камера (ВК) – это локализатор взрыва. Стенки камеры ограничивают некоторый объем, из которого не должны разлетаться продукты взрыва и осколки.

Назначение взрывных камер может быть следующим:

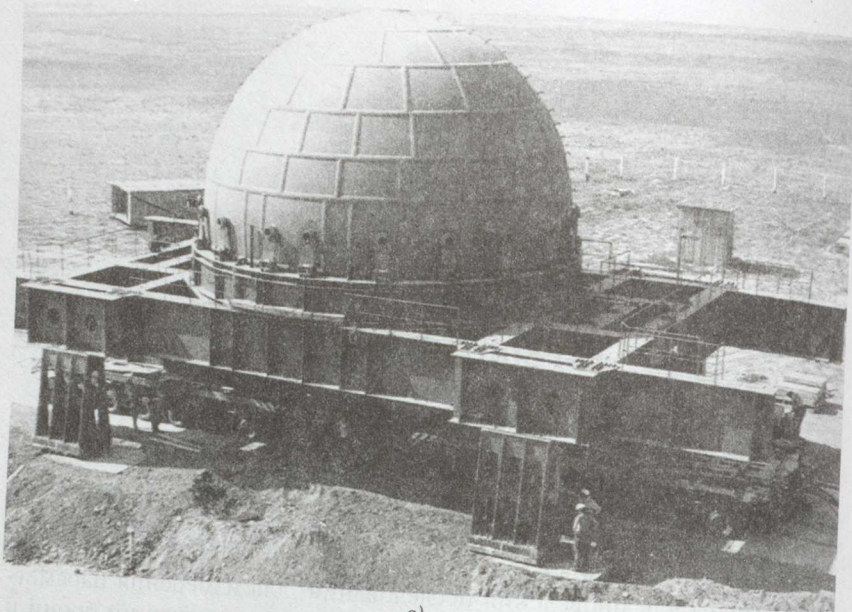
- 1) камеры для проведения исследований, для измерения параметров новых ВС и новых взрывных устройств, для испытаний брони и других материалов;
- 2) камеры для сварки взрывом, для упрочнения взрывом;
- 3) камеры для синтеза и спекания порошков (алмаза, керамики);
- 4) камеры для взрывного дробления хрупких порошков (алмаз, керамика);
- 5) камеры для безопасной перевозки ВС и взрывных устройств;
- 6) передвижные камеры для уничтожения взрывоопасных предметов, найденных в аэропортах, вокзалах, автостанциях.

По своей конструкции ВК могут быть:

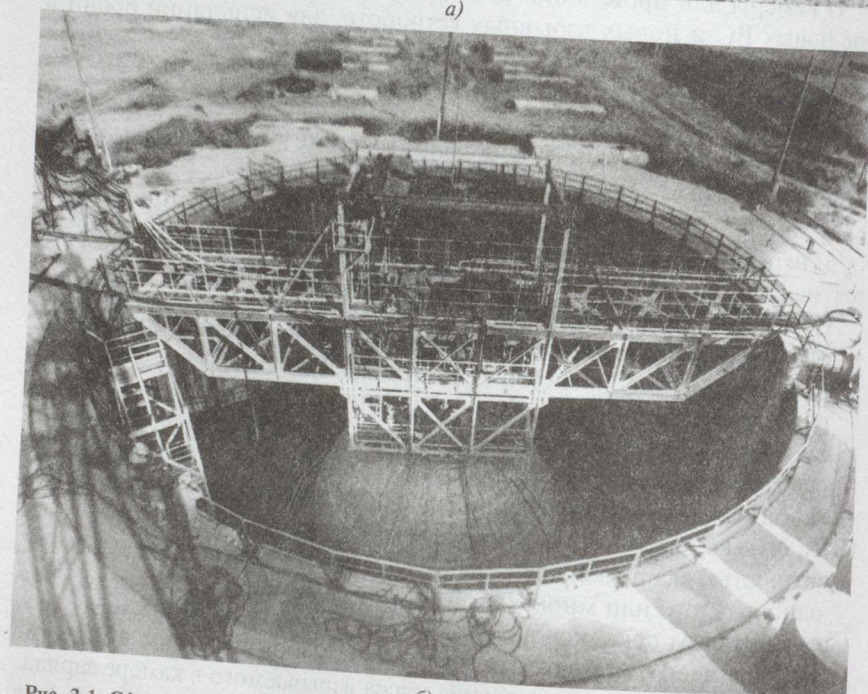
- сферические или цилиндрические, с горизонтальной или вертикальной осью, с плоскими или эллиптическими днищами;
- герметичные или негерметичные (с вентиляцией);
- стальные, железобетонные, из полимерных композитов;
- с люком или из двух разделяющихся частей для доступа внутрь;
- заполненные продуктами предыдущего взрыва, инертным газом (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), воздухом или вакуумируемые;
- полностью сварные или составные из частей, соединяемых болтами;
- однократного или многократного применения;
- с защитой от осколков внутри камеры и без такой защиты.

Прежде всего, камеры отличаются своим внутренним объемом, от которого зависит максимальная масса взрываемого в камере заряда. В качестве первой грубой оценки можно считать, что на каждый 1 кг заряда необходимо 1–4 м<sup>3</sup> объема камеры.





а)



б)

Рис. 3.1. Сферическая взрывная камера диаметром 12 м в транспортном положении (а) и после установки в бетонный колодец (б)

В 1980 г. в России были построены две сферические камеры диаметром 12 м, толщиной стенок 100 мм, массой 350 т и объемом 905 м<sup>3</sup>, рассчитанные на взрыв зарядов до 1 т (рис. 3.1) [264]. Для камер использовалась специальная очень прочная и пластичная сталь АК-36 ( $\sigma_s = 110 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\epsilon = 30\%$ ). В такой камере было проведено пять подрывов зарядов массой 250 кг, один – 500 кг и еще один – 1 т ТНТ. Кроме того, с участием автора был проведен уникальный эксперимент по синтезу ультрадисперсного алмаза взрывом в водяной оболочке заряда из ТГ40 массой 140 кг [150].

Для взрывов сосредоточенных зарядов наилучшими являются сферические камеры, так как они обладают равнопрочностью.

Обычно для исследовательских и технологических целей строятся цилиндрические камеры гораздо меньшего объема и длиной, равной 2–7 диаметрам. Такие камеры проще изготавливать, но они не равнопрочны – их слабым местом являются центральное сечение (в котором взрывается заряд) и днища.

В [151] показано, что при нагружении взрывом цилиндрические оболочки так же прочны, как и сферические, но их разрушение менее катастрофично и носит локальный характер (обычно разрушается только центральное сечение камеры).

Согласно измерениям, сделанным в [152], при одинаковых радиусе камер и массе заряда, максимальное давление на стенки сферической и цилиндрической камер одинаково, но длительность импульса примерно на 30% меньше в цилиндрической камере (благодаря боковой разгрузке центрального сечения), причем кольцевые деформации стенок камеры примерно в 7 раз больше осевых.

Отметим, что при статической нагрузке напряжение в цилиндрической камере вдвое больше, чем в сферической тех же размеров.

С 1963 г. автор проектировал, строил и испытывал различные конструкции камер, в одной из которых впервые был получен ультрадисперсный алмаз из продуктов взрыва ([86, 126, 143], см. рис. 2.11 и гл. 5).

Так, в 1992 г. для фирмы «АЛИТ» построена и успешно эксплуатируется стальная цилиндрическая камера  $\varnothing 2,5 \times 17,5 \text{ м}$  (см. рис. 3.2), состоящая из трех частей, соединяемых болтами: центральной неподвижной части с трехслойными стенками общей толщиной 300 мм и двух подвижных боковых частей с толщиной стенок 70 мм [153].

Для лучшего охлаждения алмаза и снижения нагрузки на стенки камеры перед взрывом по всей длине камеры создается водяной душ. Камера рассчитана на взрыв в воздухе зарядов массой до 30 кг.

При синтезе и спекании алмаза увеличение массы заряда позволяет получать более крупные и более совершенные моно- и поликристал-



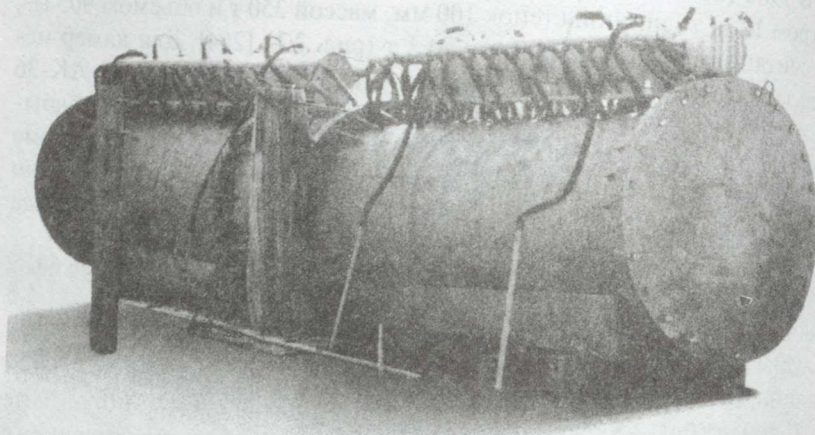


Рис. 3.2. Взрывная камера для синтеза алмаза (100 м<sup>3</sup>) фирмы «АЛИТ»

лы, а также повышать производительность камеры. Отсюда возникает необходимость увеличения объема и прочности камеры. Кроме того, большой объем ВК нужен для лучшего охлаждения и сохранения синтезированного алмаза.

В 1999–2000 гг. автором была спроектирована цилиндрическая камера Ø4,6×19 м объемом 315 м<sup>3</sup>, рассчитанная на многократный взрыв сосредоточенных зарядов массой до 70 кг. Схема воздушно – водяной системы камеры показана на рис. 3.3.

Снаружи центральная часть камеры на длине 9 м усилена железобетоном квадратного сечения 7,6×7,6 м массой 700 т. В камере перед взрывом может создаваться водяной душ и вакуум. Днища камеры и их крепление к цилиндру усилены ребрами и пластинами, установленными в камере перед днищами. При обтекании пластин ударной волной между пластинами и днищем создается турбулентность, снижающая и растягивающая импульс на днище.

При проектировании таких больших взрывных камер необходимо учитывать масштабный эффект энергетической природы, снижающий фактическую прочность камеры [154, 264].

Влиянием масштаба может быть объяснено хрупкое разрушение в упругой области крупных объектов, изготовленных из пластичной стали [155]. С точки зрения статистики, чем больше толщина стенки камеры  $t$ , тем больше вероятность появления в стенке дефекта, снижающего напряжение разрушения  $\sigma_p$ . При этом для геометрически подоб-

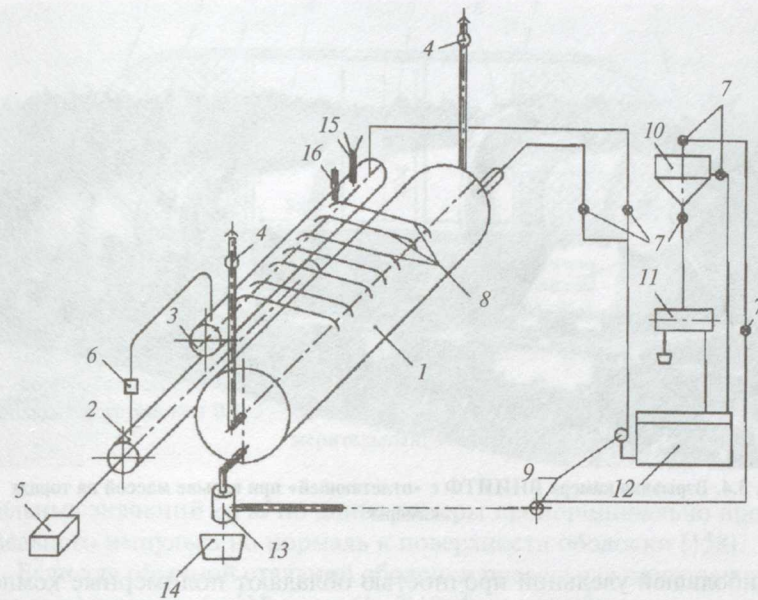


Рис. 3.3. Схема воздушно – водяной системы камеры для синтеза алмаза:

1 – камера; 2 – воздушный ресивер; 3 – расходный водяной бак; 4 – вентилятор; 5 – компрессор (10 атм); 6 – электроклапан; 7 – вентиль; 8 – трубы; 9 – водяной насос; 10 – бак осаждения суспензии; 11 – горизонтальная осадительная центрифуга с автоматической выгрузкой; 12 – главный водяной бак; 13 – фильтр-сетка для отделения крупных частиц; 14 – емкость для осколков; 15 – датчик уровня воды; 16 – электроклапан

ных камер ( $t/R_k = \text{const}$ ) со стенками толщиной  $t_1$  и  $t_2$  выполняется соотношение:

$$\sigma_{1p}/\sigma_{2p} = (t_1/t_2) - 1/m, \quad (3.1)$$

где  $m \approx 8$  – характеристика дефектности стали.

Согласно энергетической концепции, работа хрупкого разрушения объекта (работа движения трещин) осуществляется за счет упругой энергии деформации, при этом выполняется то же соотношение (3.1), но при  $m = 2$ , т.е. влияние масштаба более сильное, что подтверждается работами [154, 155].

Влияние масштабного эффекта можно значительно снизить, если цилиндрическую оболочку изготавливать из многих слоев, например, из тонкой стальной ленты или из стеклопластика [156]. У многослойной оболочки во много раз возрастает сопротивление движению трещины.



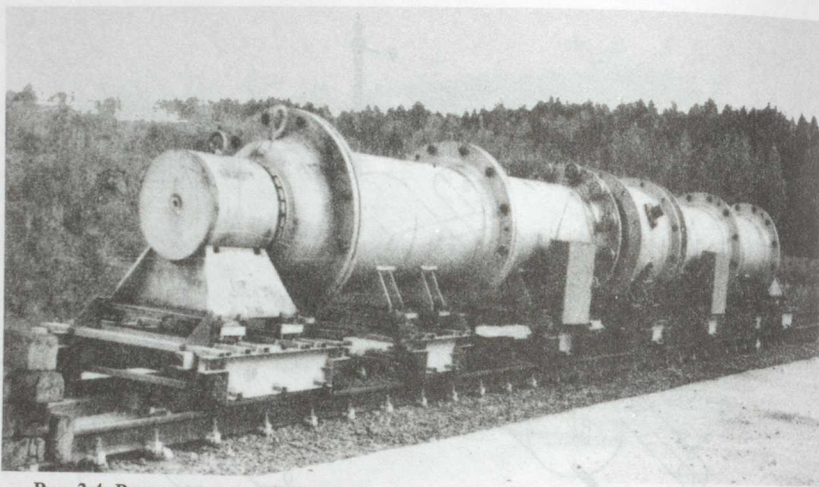


Рис. 3.4. Взрывная камера ВНИИТФ с «отлетающей» при взрыве массой на торцах камеры

Наибольшей удельной прочностью обладают полимерные композиции: очень прочные полимерные нити (кевлар, лавсан) наматываются в определенном порядке на тонкую стальную технологическую оболочку и пропитываются полимерной смолой. Такие оболочки нечувствительны к исходным дефектам и к динамичности нагружения, обладают высоким сопротивлением к распространению трещин.

Сотрудниками ВНИИТФ (г. Снежинск) спроектирована, изготовлена на заводе Уралхиммаш и успешно испытана цилиндрическая камера  $\varnothing 1,5 \times 12,5$  м, стенки которой толщиной 70 мм изготавливались намоткой с натягом стальной ленты. Камера рассчитана на заряд массой до 40 кг. В камере применена оригинальная защита плоских днищ (рис. 3.3). Снаружи к днищам плотно прижаты стальные болванки, которые могут передвигаться вдоль оси камеры на рельсовых тележках. При взрыве импульс передается от днищ к болванкам, в результате днища остаются практически неподвижными, а болванки начинают двигаться на тележках и затем тормозятся (эффект бильярдных шаров).

Эта камера была использована автором для синтеза алмаза взрывом заряда массой до 20 кг в водяной оболочке и без оболочки.

В качестве характеристики удельной взрывной нагрузки на камеру можно принять отношение массы заряда  $m$  к массе  $M$  цилиндрической оболочки камеры длиной, равной двум диаметрам камеры [157]. Отношение  $m/M$  пропорционально кольцевой деформации наиболее нагруженного центрального сечения камеры [157], а распределение макси-

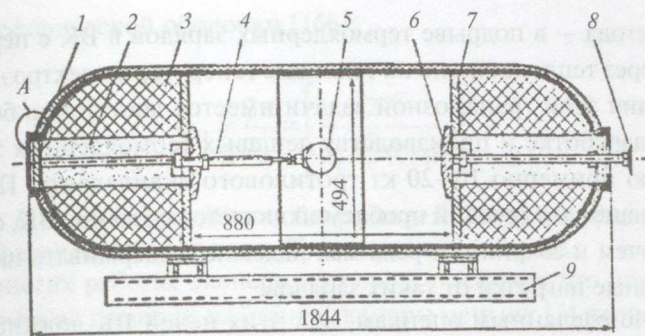


Рис. 3.5. Схема ВЗК:

1 – корпус (стеклопластик); 2 – пробка (пенопласт); 3 – демпфер (пенопласт); 4 – шпилька для установки ВВ; 5 – заряд ВВ; 6 – крышка люка; 7 – диафрагма; 8 – штوك измерительный; 9 – опора

мальных значений  $m/M$  по длине камеры пропорционально проекции удельного импульса на нормаль к поверхности оболочки [158].

Если для обычной стальной оболочки предельная разрушающая нагрузка составляет  $(m/M)_{\max} = (1-3)10^{-3}$ , то для оболочек из полимерных композиций  $(m/M)_{\max} = (10-20)10^{-3}$  [156].

Одной из разновидностей взрывных камер является взрывозащитный контейнер (ВЗК) одноразового использования, для которого важна высокая надежность предотвращения хрупкого разрушения при минимальной массе (для транспортабельности).

Конструкции цилиндрических и сферических ВЗК с использованием волокнистых композитов (стекловолокно и полимерное связующее) разработаны специалистами ВНИИЭФ (г. Саров) [159]. Как и для камер со стенками из слоев стальной ленты, стекловолокно наматывается на оболочку из мягкой стали. Нагрузка на днища снижается пенопластовыми демпферами внутри ВЗК (рис. 3.5).

Предельная окружная деформация стеклопластикового слоя без его повреждения  $\epsilon = 3,5\%$ . Значение  $\epsilon$  линейно растет с увеличением относительной массы заряда:  $\epsilon = 170,2(m/M)$ .

По результатам испытаний несущая способность композитных ВЗК следующая: ВЗК  $\varnothing 0,5 \times 1,8$  м массой 200 кг выдерживает взрыв сферического заряда массой 2 кг, а ВЗК  $\varnothing 2,5 \times 9,5$  м массой 25 т – взрыв заряда до 200 кг (в тротиловом эквиваленте).

В будущем разработка высокопрочных и надежных герметичных ВК очень большого объема позволила бы решить энергетическую проблему человечества, реализовав предложение академика А.Д. Сахарова использовать для производства энергии взрывной термоядерный синтез [264].



Суть метода — в подрыве термоядерных зарядов в ВК с передачей энергии через теплоноситель на тепловые генераторы электроэнергии. Для решения этой грандиозной задачи имеется достаточно большой опыт по разработке и производству дешевых термоядерных зарядов мощностью примерно 10–20 кт тротилового эквивалента. Поэтому главной и наиболее трудной проблемой является создание ВК, способной в рабочем и аварийном режимах надежно выдерживать циклические взрывные нагрузки от таких зарядов.

Согласно сделанным оценкам, для этих целей ВК должна иметь диаметр примерно 130 м и массу примерно  $10^7$  т [264].

Возможный вариант конструкции цилиндрической ВК: на обечайку из вязкой стали 12Х18Н10Т наматывается много слоев стального каната с пропиткой тяжелым гудроном (с наполнителем из стальной стружки, свинцовой дроби, окатышей и т. п.).

При проектировании ВК любого назначения надо учитывать, что нагрузка на камеру зависит не только от массы заряда, но также от конфигурации и состава заряда. Худший вариант — взрыв сосредоточенных зарядов — сферических или цилиндрических с  $L/d = 1-2$ . При одинаковой массе заряда нагрузка на цилиндрическую камеру уменьшается с увеличением длины заряда (распределенное осесимметричное нагружение), а также, если заряд плоский (диск) с соотношением длины к диаметру  $L/d < 1$ . Для плоского заряда нагрузка определяется только частью заряда, разлетающейся в радиальном направлении, а размер зоны деформации камеры не зависит от толщины заряда [160], если  $L/(R_k t)^{1/2} < 1$ , где  $R_k$ ,  $t$  — радиус и толщина стенки камеры,  $L$  — толщина диска.

Кроме того, в реальных системах возможны отклонения от симметричной схемы нагружения камеры, связанные с нарушением симметрии положения заряда или с асимметричным разлетом продуктов детонации.

Согласно [161], относительное смещение заряда от центра сферической камеры на значение  $c = e/R_k$  ( $e$  — абсолютное смещение) изменяет величину импульса  $i$  и деформации  $s$  камеры (так как  $c \sim i/w$ , где  $w$  — частота свободных колебаний оболочки) следующим образом:

$$i_0/i_c = (R_k \pm e)^2 / R_k^2 = (1 \pm c)^2. \quad (3.2)$$

При взрыве заряда в камере стенки камеры смещаются от положения равновесия и затем начинают колебаться с собственной частотой  $\omega_0$ .

Для сферической оболочки [166]:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \left[ \frac{2E}{\rho_c R_c^2 (1-\mu)} \right]^{1/2}, \quad (3.3)$$

где  $E$ ,  $\mu$ ,  $R_c$ ,  $\rho_c$  — модуль Юнга, коэффициент Пуассона, радиус и плотность сферической оболочки;  $T_0$  — период колебаний.

Во многих работах экспериментально показано, что длительность динамической нагрузки на стенках камеры меньше 1/4 периода ее собственных колебаний ( $\tau < T_0/4$ ), т.е. характер нагружения камер импульсный [162]. Поэтому максимальное смещение оболочки относительно положения равновесия определяется соотношением [163]:

$$\delta_{\max} = J_r / \rho_c t \omega_0, \quad (3.4)$$

где  $J_r$  — импульс, отраженный от стенок.

Интересно, что деформация сферической и короткой цилиндрической ( $L/d = 1$ ) камер в первом полупериоде колебаний не является максимальной. Уже после затухания ударной волны наблюдается раскочка колебаний с увеличением амплитуды до трех раз. Такая раскочка объясняется возбуждением и взаимодействием равноправных форм собственных колебаний оболочки с близкими частотами [152, 161].

Для бесконечной круговой цилиндрической оболочки частота свободных радиальных колебаний равна:

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = \frac{1}{R_k} \sqrt{\frac{E}{2\pi\rho}}. \quad (3.5)$$

Во всех зонах цилиндрической камеры, кроме окрестностей заземленных торцев, регистрируемый при взрывах процесс колебаний носит гармонический характер [152].

Спектр частот  $f_k$  свободных колебаний цилиндра длиной  $L$  при заземленных краях (с днищами):

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi}; \quad \frac{\omega_k^2}{2\pi} = 1 + \frac{\pi^4 R_k^2 t}{12(1-\mu)L^4} \left( 2k - \frac{1}{2} \right), \quad (3.6)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

Для цилиндра с днищами при взрыве, кроме радиальных, возникают изгибные колебания, при которых максимальные напряжения наблюдаются вблизи днищ и в центре днища при изгибных колебаниях [164].



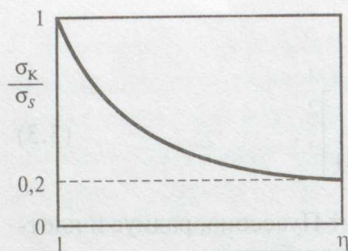


Рис. 3.6. Зависимость числа циклов знакопеременной нагрузки от упругих напряжений

Пластические деформации реализуются лишь в поверхностных слоях стенок камеры, которые при многократном нагружении будут изменять свою структуру, разрыхляться, терять прочность. Соответственно реальная толщина несущего слоя оболочки будет уменьшаться. Поэтому разрушение от высоких циклических изгибных напряжений должно иметь усталостный характер [164].

При расчете цилиндрических камер на многократный взрыв максимально допустимую массу заряда надо выбирать с учетом зависимости числа циклов  $n$  знакопеременных напряжений от относительного напряжения  $\sigma_k / \sigma_s$  ( $\sigma_s$  — предел текучести стали, из которой сделана камера) в упругой области (рис. 3.6). Например, для сталей, применяемых в судостроении  $n \rightarrow \infty$  при  $\sigma_k / \sigma_s = 0,2$ .

Отметим, что по результатам испытаний камер из сталей 25 и 35 динамический предел упругости этих сталей ( $\sigma_s = 40 \text{ кг/мм}^2$ ) на 40% больше, чем для статических условий [165].

Различие между статической и динамической прочностями взрывных камер связано с колебательным характером деформации камер при взрыве. Например, чем больше масса отдельных узлов и деталей, жестко прикрепляемых к гладкой оболочке, тем больше дополнительные изгибные колебания в зоне таких «присоединенных масс». В результате «усиленная» массивными деталями камера разрушается быстрее и при меньших массах взрывааемых зарядов.

Чтобы не исказить колебаний, взрывные камеры всегда свободно устанавливаются на опорах или подвешиваются на шарнирах.

К камерам, предназначенным для динамического синтеза и спекания алмаза, предъявляются дополнительные требования, связанные с необходимостью сохранения алмаза.

Во-первых, синтезируемый алмаз имеет низкую температуру начала окисления ( $400^\circ\text{C}$ ), поэтому газовая атмосфера в камере должна быть бескислородной, иначе весь алмаз сгорит. Действительно, взрыв в воздухе не позволяет сохранить ультрадисперсный алмаз. Наиболее просто проводить взрывы в атмосфере продуктов детонации (ПД) от предыдущих взрывов, поскольку в ПД практически отсутствует свободный кислород.

Во-вторых, температура синтеза алмаза ( $3000\text{--}4000 \text{ K}$ ) значительно выше температуры начала графитизации алмаза ( $1000^\circ\text{C}$ ), поэтому алмаз нужно очень быстро охладить от  $4000 \text{ K}$  до  $1000^\circ\text{C}$ . Охлаждение

возможно только с поверхности частиц алмаза за счет теплообмена с более холодными ПД.

В свою очередь, быстро охладить ПД можно только за счет совершенства газообразными ПД работы по ударному сжатию и ускорению окружающей заряд среды — газовой, жидкой или твердой. В различных технологиях в качестве такой среды используются ПД, углекислый газ, слой воды или льда вокруг заряда, смесь ПД с распыленной водой.

Очевидно, для эффективного охлаждения алмаза масса среды, ускоряемая и сжимаемая расширяющимися ПД, должна быть достаточно большой. Следовательно, должен быть достаточно большой объем камеры.

### 3.2. Способы снижения взрывных нагрузок на стенки камеры

Применение специальных способов ослабления воздушной УВ, действующей на стенки камеры при взрыве в камере заряда ВВ, позволяет улучшить надежность работы камеры при многократном взрывании зарядов или увеличить предельно допустимую массу заряда.

Очевидный способ — устранение воздуха путем вакуумирования камеры. Но технически это не всегда возможно. Кроме того, остается давление ПД, которое уменьшается пропорционально кубу расстояния до сосредоточенного заряда.

Принцип работы других применяемых устройств состоит в окружении заряда пористой средой (пенной, пенопластом, песком, водно-капельными завесами — любыми газосодержащими многофазными средами, см. [167]).

Исследования степени ослабления воздушной УВ показали, что решающая роль принадлежит сжимаемости и инерционности пористой среды. Сжимаемость характеризуется скоростью звука в среде  $c$ . Для водно-воздушной пены  $c_c < c_b$  ( $c_b$  — скорость звука в воздухе), а для взвеси пузырьков воздуха в воде  $c_c < c_b < c_j$  ( $c_j$  — скорость звука в воде). Инерционность среды определяется массой пористой оболочки вокруг заряда.

Степень ослабления воздушной УВ при взрыве заряда из тротила в пене относительно взрыва в воздухе видна из рис. 3.7.

В подземных выработках давно и широко применяется защита от воздушных ударных волн с помощью воздушно-водяной завесы [168, 169]. При взаимодействии ударной волны с водно-воздушной смесью быстрое затухание волны вызвано затратами энергии [168] на:

отражение УВ от отдельных капель и струй как от жесткой пространственной решетки — 20%;

рассеивание энергии УВ на элементах решетки — каплях и струях — 30%;



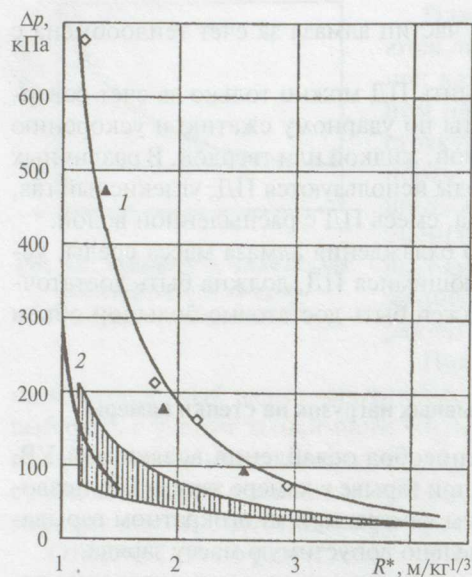


Рис. 3.7. Зависимость амплитуды воздушной УВ ( $\Delta p$ ) от приведенного расстояния до заряда из тротила ( $R^*$ ):

1 — для открытого заряда; 2 — для заряда в водно-воздушной пене; заштрихованная область — заряды в оболочках из жидкости; ▲ — масса заряда 0,1 кг; ◊ — масса заряда 1,0 кг

распыление капель и струй — 40%;  
испарение поверхностных слоев воды — 1%;  
перемещение паро-водо-воздушного поршня и преодоление сил трения о стенки выработки — 9%.  
За счет этих факторов распыленная вода может снижать давление и импульс воздушной УВ в 1,4–4 раза [168].  
Таким образом, водяной душ, создаваемый в камере перед взрывом, не только усиливает охлаждение ПД и алмаза, но также значительно уменьшает нагрузки на камеру.

Синтез УДА проводился с использованием водяной оболочки вокруг заряда [126, 143], и было неясно, как оболочка изменяет давление на стенке камеры. Согласно расчетам камеры «АЛИТ», вода вокруг заряда должна увеличивать деформацию стенок камеры. С другой стороны, опыты, проведенные в 1986 г. в камере ВНИИТФ с отлетающей массой на днищах, показали, что при взрыве в водяной оболочке расстояние отлета массы от днища в 2 раза меньше, чем при взрыве такого же заряда (20 кг) в воздухе. Следовательно, оболочка вдвое снижает максимальное давление на днища.

В 2001 г. была опубликована работа [167], где экспериментально показано, что ослабление амплитуды воздушной УВ при взрыве заряда из тротила в водяной оболочке с массой, равной примерно четырем массам заряда, практически такое же, как при использовании пены (рис. 3.7).

Например, для приведенного расстояния  $R^* = R/m^{1/3}$  ( $R$  — расстояние до заряда массой  $m$ ), реализованного в наших опытах в камере, ослабление, измеренное в [167] на открытом воздухе, составило  $\rho_B/\rho_{ж} = 90/30 = 3$ , т. е. больше чем в камере (жесткая труба), что вполне

естественно. По-видимому, в этих опытах такое же ослабление УВ, как при использовании пены, связано с компенсацией меньшей сжимаемости воды большей ее массой (по сравнению с пеной). С увеличением массы оболочки ослабление должно расти.

Как показала фоторегистрация разлета водяной оболочки, начиная с расстояния, равного двум радиусам сферического заряда, оболочка теряет устойчивость, разрушается на отдельные части, между которыми прорываются ПД. Начинается интенсивное турбулентное перемешивание воды с ПД, сопровождаемое дроблением воды на капли. В итоге получается такое же распределение потерь энергии, как для воздушно-капельной завесы.

Отметим, что измерялись только амплитуды давления. Вопрос об уменьшении импульса остается открытым.

Очевидно, одновременное применение вакуумирования, водяного душа и водяной оболочки даст максимальное снижение нагрузки на камеру.

Трудной является проблема защиты стенок камеры от осколков. При взрыве даже легкие пластмассовые детали сборок оставляют на стенках заметные следы. Основной способ защиты — экранирование.

Кроме водяных струй, можно использовать деревянные щиты, асбоцементные трубы. Если известно направление движения основной массы осколков, то в определенном месте на стенке камеры можно установить толстый стальной экран.

### 3.3. Расчеты импульсных нагрузок на стенки камеры

Обычно численные расчеты взрывной камеры проводятся в два этапа. На первом этапе определяют газодинамические нагрузки на стенки камеры (внутреннее давление), а на втором — проводят упругопластические расчеты напряженно-деформированного состояния конструкции камеры от действия нагрузок, полученных на первом этапе.

При расчете нагрузок численно интегрируются двумерные уравнения газовой динамики с использованием лагранжево-эйлеровых разностных сеток [170].

Уравнение состояния (УРС) ПД можно взять из [171] в виде  $p = p(\gamma, E)$ , либо рассчитать по УРС типа идеального газа с переменным показателем адиабаты  $\gamma$ . Например, для заряда из ТГ40  $\gamma = 1,33 + 1,67\rho/\rho_0$ , где  $\rho_0 = 1,67 \text{ г/см}^3$ .

Обычно в расчетах задается мгновенное инициирование зарядов по всему объему, поскольку нагрузки на камеру слабо зависят от способа инициирования заряда.

Газ, заполняющий камеру, в расчетах принимается идеальным с постоянным показателем адиабаты.



При применении водяной оболочки вокруг заряда для описания разлета воды можно использовать УРС воды в виде:

$$\left. \begin{aligned} p &= p_x + \Gamma \rho (E - E_x); \\ p_x &= \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1); \\ E_x &= c_0^2 \int \frac{\delta^n - 1}{\delta^{2n}} d\delta \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

с параметрами:  $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ ;  $c = 1,5 \text{ км/с}$ ;  $n = 7,15$ ; коэффициент Грюнхайзена  $\Gamma = 0,105$  ( $\delta = \rho/\rho_0$ ).

Для численных расчетов можно использовать комплекс программ СИГМА [171] или ВОЛНА-81 [172].

Если заряд и камера сферические, то требуется решить более простую одномерную задачу. Результаты ее решения, полученные в [163], приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Расчетные значения давления и импульса на стенке сферической камеры

$R_k/r_0$	$p_a$ , атм.	$p_r$ , атм.	$p_r/p_a$	$\bar{J}_r^+$
10	43,79	314,11	7,17	10,944
12	30,30	208,28	6,87	9,493
15	19,81	127,40	6,43	9,804
20	10,93	57,60	5,27	7,448

Примечание.  $R_k, r_0$  — радиусы камеры и заряда из ТГ50;  $p_a$  — давление в воздушной УВ, падающей на стенку камеры;  $p_r$  — давление в УВ, отраженной от стенки;  $\bar{J}_r^+ = J_r^+ / r_0 \sqrt{\rho_0 \rho_0}$  — безразмерный импульс положительной фазы сжатия ( $p_0, \rho_0$  — начальные параметры воздуха в камере).

Расчетные значения  $p_r$  согласуются с результатами измерений давления в [152] (для  $R_k/r_0 = 11$   $p_r = 210$  атм).

Значения  $p_r$  и  $J_r$  в зависимости от приведенного расстояния до заряда  $Z = R/m^{1/3}$  можно определить по графикам рис. 3.8 [162].

Отметим, что отношение давлений в отраженной и падающей волнах зависит от давления УВ и изменяется от  $p_r/p_a = 2$  для слабой звуковой волны до  $p_r/p_a = 13,92$  для сильной УВ [162].

Зная давление и импульс на стенке камеры в предположении треугольного профиля давления, можно оценить время импульса.

В отличие от сферической камеры, взрыв сосредоточенного заряда в цилиндрической камере создает неоднородную картину нагружения.

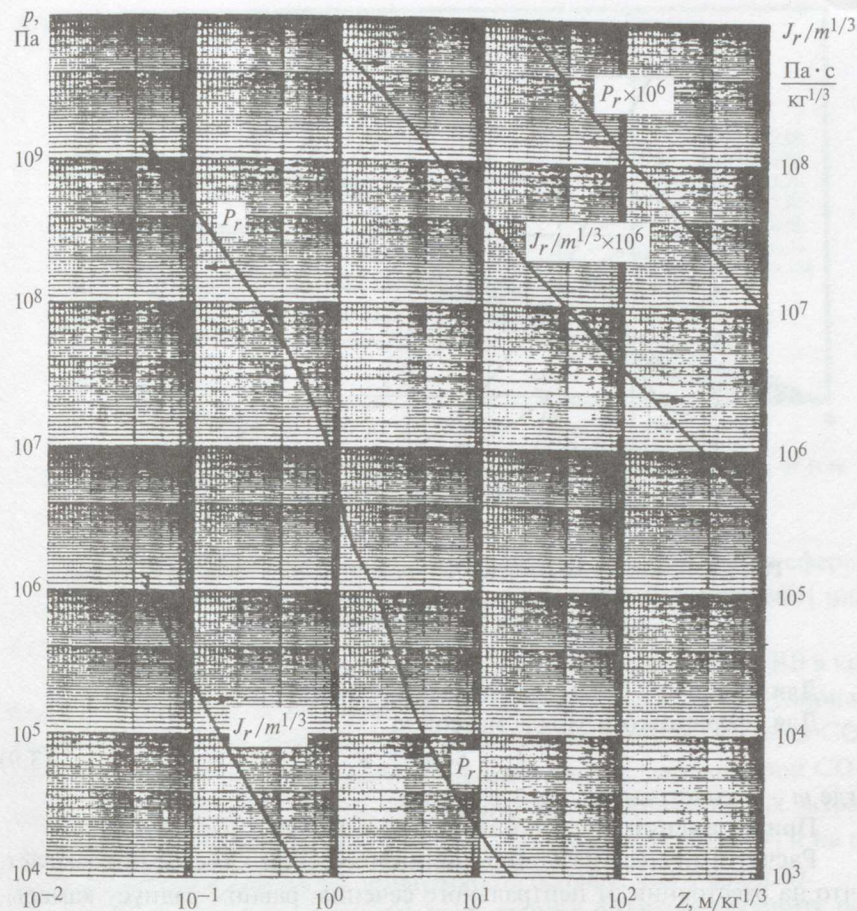


Рис. 3.8. Давление и импульс нормально отраженной УВ для заряда из ТНТ в зависимости от приведенного расстояния  $Z = r/m^{1/3}$

При взрыве УВ падает на стенку цилиндрической камеры под разными углами  $\varphi$  ( $\varphi$  — угол между нормалью к стенке и направлением движения УВ). Для центрального сечения камеры и центра днищ  $\varphi = 0$ .

Согласно [162], рассчитать удельный импульс падающей на стенку УВ можно с помощью следующих формул:

$$J_T/J_H = \cos \varphi + (R_k/r_0) \sin \varphi, \quad (3.8)$$

где  $J_T, J_H$  — импульсы для скользящей ( $\varphi = 90^\circ$ ) и нормальной ( $\varphi = 0$ ) УВ.



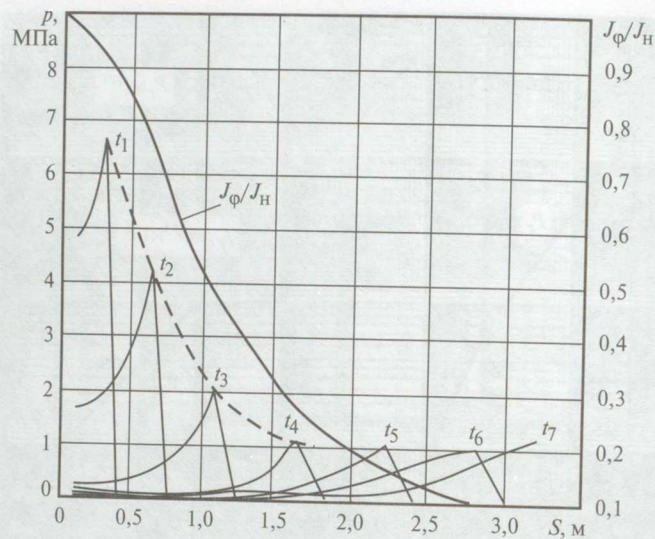


Рис. 3.9. Изменение давления (расчет согласно [174]) и импульса на стенке цилиндрической камеры в зависимости от расстояния до центрального сечения (масса заряда 1 кг, диаметр камеры 2,5 м)

Для  $R_k/r_0 < 10$   $\beta = 1/16$ , а для  $R_k/r_0 = 10 \div 30$   $\beta = 0,1$ .  
Для сферического заряда массой  $m$

$$J_H = 54m^{2/3}/R_k, \quad (3.9)$$

где  $m$  — в килограммах,  $R_k$  — в метрах.

При отражении от стенки импульс на стенку удваивается.

Расчет импульса на стенке цилиндрической камеры показывает, что на расстоянии от центрального сечения, равном радиусу камеры, импульс на стенке камеры уменьшается в 2,2 раза (рис. 3.9).

Давление на стенку ( $p_r$ ) зависит от трех взаимосвязанных параметров: радиуса камеры, расстояния до центрального сечения камеры и угла отражения УВ от стенки.

Для центрального сечения зависимость  $p_r$  от радиуса такая же, как для сферической камеры, а для других сечений увеличиваются и расстояние до заряда, и угол падения УВ на стенку.

Из рис. 3.10 [162] видно, что при  $\varphi < 40^\circ$  для сильной волны и при  $\varphi < 70^\circ$  для слабой волны можно считать, что  $p_r$  не зависит от угла  $\varphi$ .

Расчетные давления на стенку цилиндрической камеры ( $R_k = 1,25$  м,  $m = 1$  кг) приведены на рис. 3.9 [174].

Как видно из рис. 3.9, давление (как и импульс) быстро падает с расстоянием от центрального сечения камеры: при  $S = 2R_k$  давление уменьшается в 6 раз и далее практически не меняется.

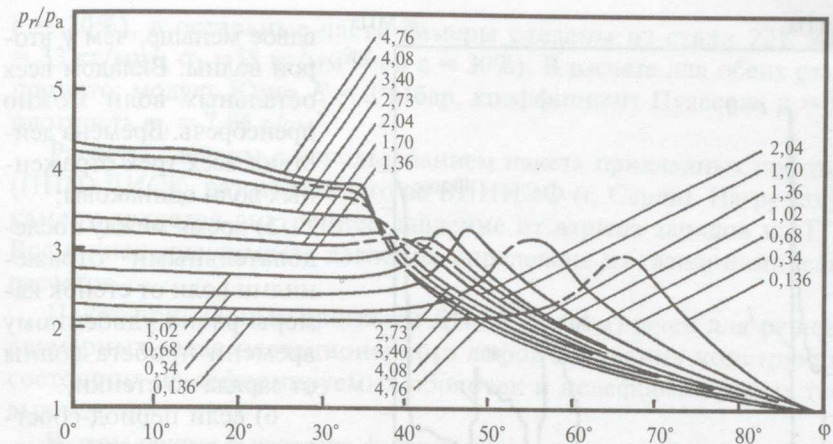


Рис. 3.10. Зависимость отношения амплитуд отраженной и падающей УВ  $p_r/p_a$  от угла падения УВ различной амплитуды

На рис. 3.11 даны некоторые результаты расчета давлений в сферической камере, заполненной углекислым газом ( $p_0 = 1$  атм) [175] или воздухом [163] при взрыве в ее центре заряда из ТГ50.

Если для камеры с  $R/r_0 = 12$  (что соответствует взрыву 1 кг ВВ в камере объемом  $1 \text{ м}^3$ ), заполненной воздухом (средняя молекулярная масса  $m = 29$ )  $p_r = 208$  атм, то при заполнении той же камеры  $\text{CO}_2$  ( $m = 44$ )  $p_r = 130$  атм. Меньшее давление в камере, заполненной  $\text{CO}_2$ , можно объяснить большим затуханием УВ за счет больших затрат энергии на возбуждение всех степеней свободы молекулы  $\text{CO}_2$  и на ее ионизацию (поэтому у  $\text{CO}_2$  теплоемкость больше, чем у воздуха).

Таким образом, приведенные здесь данные позволяют оценить нагрузки на стенки камер без проведения двумерных численных расчетов.

При проведении оценок взрывных нагрузок на камеру обычно используют следующие упрощающие предположения [162]:

- 1) падающая и отраженная волны имеют треугольные профили;
- 2) длительность этих волн рассчитывается по известным значениям импульсов и давлений:

$$t = 2J/p.$$

3) давление на стенку при косом отражении можно определять с использованием давления нормального отражения, считая отражение регулярным и не зависящим от угла падения;

4) вторая отраженная от стенки волна имеет вдвое меньшую амплитуду и импульс, чем первая, а у третьей отраженной волны эти значения



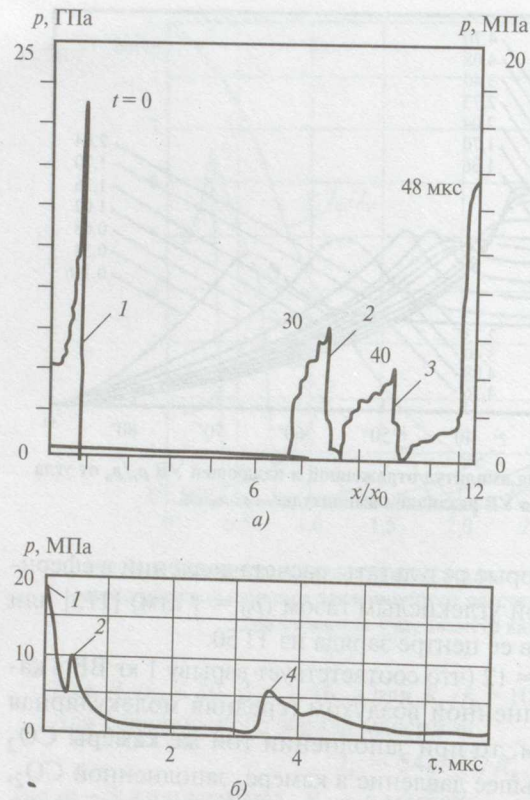


Рис. 3.11. Расчетные давления в сферической камере с отношением  $R_k/r_0=12$ :

а – камера заполнена  $\text{CO}_2$  [175]: 1 – давление на поверхности заряда ( $t=0$ , масштаб слева); 2, 3 – УВ, движущаяся к стенке ( $t_2=30$  мкс,  $t_3=40$  мкс); 4 – УВ в момент ее отражения от стенки ( $t=48$  мкс); б – камера заполнена воздухом [163]: 1 – УВ, отраженная от стенки; 2 – УВ, отраженная от границы ПД – воздух; 3 – УВ, отраженная от центра камеры

квазистатического давления определяется отношением площади сечения разгрузочных отверстий к площади внутренней поверхности камеры [162].

Ниже приводятся основные результаты прочностных расчетов камеры  $\varnothing 2,5 \times 17,5$  м фирмы «АЛИТ». Центральная часть камеры длиной 2,5 м имеет два внутренних слоя толщиной по 100 мм каждый из очень прочной стали АК-36 ( $\sigma_s=100$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_b=110$  кг/мм<sup>2</sup> при удлинении

вдвое меньше, чем у второй волны. Вкладом всех остальных волн можно пренебречь. Времена действия всех трех отраженных волн одинаковы;

5) время между последовательными отражениями волн от стенок камеры равно удвоенному времени пробега волны от заряда до стенки;

6) если период собственных колебаний камеры больше, чем время между первой и третьей волнами, то можно использовать еще более сильное упрощение, объединив все три импульса давления в один и умножив амплитуду и импульс первой волны на множитель 1,75.

Наконец, после завершения циркуляции волн в камере устанавливается статическое избыточное давление. Для герметичных камер это давление зависит от отношения массы заряда к объему камеры. А для негерметичных камер время существования в камере

$\epsilon=20\%$ ), а остальные части камеры сделаны из стали 22К ( $\sigma_s=33$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_b=58$  кг/мм<sup>2</sup> при  $\epsilon=30\%$ ). В расчете для обеих сталей принято: модуль Юнга  $E=2$  Мбар, коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$ , плотность  $\rho_0=7,85$  г/см<sup>3</sup>.

Расчеты сделаны с использованием пакета прикладных программ (ППП) ДИСК, разработанного во ВНИИЭФ (г. Саров). Нагрузкой на камеру является внутреннее давление от взрыва зарядов из ТГ40. Временная зависимость давления определена из газодинамических расчетов.

Пакет прикладных программ ДИСК предназначен для решения двумерных задач нестационарного деформирования конструкций, состоящих из деформируемых оболочек и недеформируемых твердых тел.

В этом пакете в качестве физических соотношений приняты уравнения теории течения с линейным кинематическим и изотропным упрочнением. Вариационное уравнение движения формируется в смешанной форме (усилия – перемещения), исходя из принципа возможных перемещений.

Численное решение основано на конечно-разностной аппроксимации вариационного уравнения движения по пространственной переменной и явной схеме интегрирования по времени.

О корректности использования ППП ДИСК свидетельствует согласие с экспериментальными данными результатов расчетов большого числа тестовых задач.

В результате расчетов взрывной камеры получены эпюры максимальных деформаций стенок и днища, временные зависимости давления в центральном сечении и на днище.

В табл. 3.2 приведены параметры шести расчетных вариантов и максимальные значения деформаций камеры для каждого варианта. В любой точке камеры допустимы только упругие деформации ( $\epsilon < 0,2\%$ ). Основные результаты расчетов следующие:

1) как и ожидалось, максимальные деформации и давления наблюдаются в центральном сечении на длине, близкой к длине заряда. Затем давление на стенках падает и не превышает 10 атм;

2) заряды массой 40 кг в оболочке из воды создают в центральном сечении пластическую деформацию, поэтому многократный подрыв таких зарядов недопустим;

3) удлинение заряда массой 40 кг снижает вдвое нагрузки на днище;

4) максимальная нагрузка на днище составляет 800 т и может быть удержана болтами, без применения отлетающей массы;

5) без учета турбулентного перемешивания воды с ПД применение водяной оболочки увеличивает нагрузку на камеру. Однако проведен-



ные нами на камере ВНИИТФ эксперименты показали, что применение водяной оболочки толщиной, равной радиусу заряда, снижает давление на днище камеры в 2 раза по сравнению с взрывом такого же заряда, но без оболочки.

Таблица 3.2. Результаты прочностных расчетов вариантов нагружения взрывной камеры фирмы «АЛИТ»

№№ вар.	Масса, кг		Диаметр, м		Длина, м		Максимальная деформация, %	
	ВВ	H <sub>2</sub> O	ВВ	H <sub>2</sub> O	ВВ	H <sub>2</sub> O	Продольная	Кольцевая
1	40	400	0,127	1,90	0,70	1,04	0,60	0,47
2	40	400	0,249	0,50	0,48	2,34	0,53	0,28
3	30	300	0,12	1,60	0,46	1,95	0,30	0,20
4	20	200	0,10	1,50	0,40	1,85	0,175	0,15
5	20	80	0,10	0,44	0,40	0,60	0,09	0,042
6	20	0	0,10	0	0,40	0	0,07	0,035

### 3.4. Циркуляция ударных волн и температурные поля в камере

До сих пор мы оценивали параметры ударноволнового нагружения стенок камеры при отражении первой, наиболее сильной, УВ.

Из рис. 3.11 видно, что давление ПД внутри камеры имеет сложный характер. Циркуляция УВ в камере определяет температуры ПД [175], что очень важно для сохранения синтезируемого в камере алмаза.

В сферически расширяющихся ПД давление падает очень быстро. Поскольку плотность ПД уменьшается по закону  $r^{-3}$ , то давление уменьшается как  $r^{-3\gamma}$ , где для плотных ПД до  $r < 2r_0$   $\gamma = 3$ , а при  $r > 2r_0$   $\gamma \approx 5/4$  [176].

Начиная со значения  $r = 10r_0$ , УВ в воздухе отрывается от ПД. Давление в ПД оказывается меньше, чем в окружающем ударносжатом воздухе. Поэтому от границы раздела ПД – воздух в ПД к центру камеры идет так называемая внутренняя ударная волна. Скорость этой УВ относительно воздуха меньше скорости воздуха за фронтом УВ, поэтому внутренняя УВ сносится потоком.

В момент подхода УВ к стенке камеры слабая внутренняя волна успевает сжать основную массу ПД.

Таким образом, в камере можно различать два вида ПД: разреженное ядро и более плотную «оболочку», которую сжала внутренняя УВ [175].

На рис. 3.12 показаны результаты расчетов, сделанных в [175] для сферической камеры с отношением  $R_k/r_0 = 12$ , заполненной CO<sub>2</sub>.

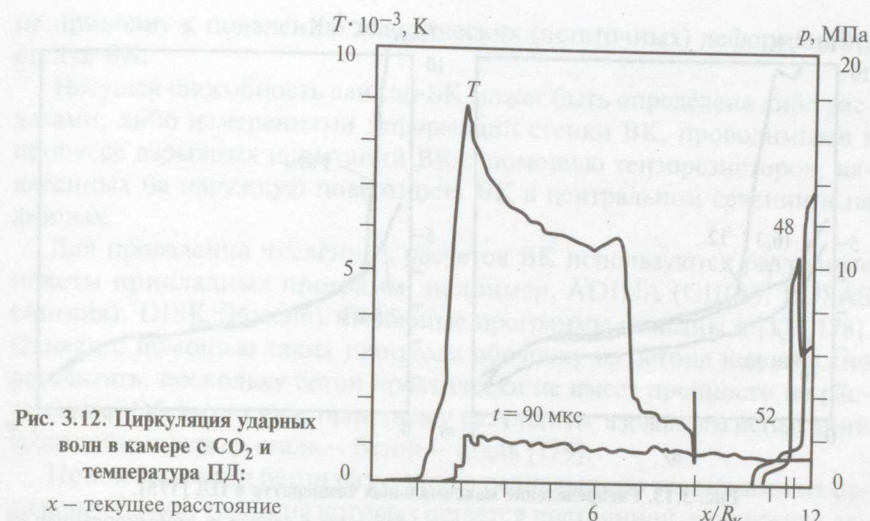


Рис. 3.12. Циркуляция ударных волн в камере с CO<sub>2</sub> и температура ПД: x – текущее расстояние

В момент времени  $t = 52$  мкс отраженная от стенки УВ доходит до границы ПД – CO<sub>2</sub> и распадается на две.

В момент времени  $t = 90$  мкс отраженная сходящаяся к центру сферической УВ догоняет внутреннюю УВ, сливается с ней и сжимает малоплотное ядро ПД.

В результате плотная оболочка ПД сжимается двумя УВ, а разреженное внутреннее ядро – одной УВ. Поэтому температура ядра очень высока. Согласно расчетам, для  $t = 90$  мкс (см. рис. 3.12 во внешнем слое ПД  $T < 2000$  К, а для ядра достигаются значения  $(6+8)10^3$  К.

Далее волна отражается от центра, доходит до стенки и циркуляция волн повторяется с уменьшающимися амплитудами. После затухания УВ в камере реализуется существенно неоднородное температурное поле: очень горячее ядро ПД (25% массы ПД), затем сравнительно холодный слой ПД и опять сильно нагретый газ. Перемешивание этих слоев будет ускорять выравнивание температур.

Из этих расчетов следует вывод: для снижения температуры ПД внутренняя УВ должна сжать всю массу ПД (чтобы не было разреженного ядра в ПД). Этого можно достичь двумя способами:

увеличить размеры камеры ( $R_k/r_0 > 12$ ), что задержит приход УВ, отраженной от стенки (рис. 3.13, а);

увеличить плотность газа в камере, что увеличит скорость внутренней УВ (рис. 3.13, б).

Рассмотрим особенности взрыва в вакуумированной камере [175]. Поскольку нет среды, поглощающей энергию ПД, расширение ПД и циркуляция УВ в ПД происходит при постоянной полной энергии ПД.



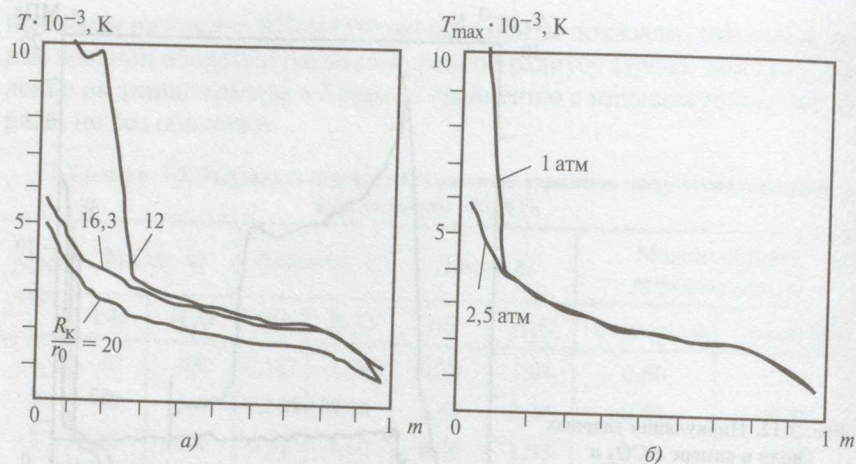


Рис. 3.13. Распределение максимальных температур в ПД [175].

По горизонтальной оси отложена массовая координата в заряде  $m$ , нормированная на единицу:  $a$  – влияние радиуса камеры (расчет для  $R_k/r_0 = 12; 16,3; 20$ );  $b$  – влияние плотности газа (расчет для  $R_k/r_0 = 16,3$ , азот с давлением 1 и 2,5 атм)

Но в начальный момент примерно половина всей энергии ПД является упругой. После разлета ПД эта часть энергии переходит в тепловую. Следовательно, средняя температура в ПД будет выше, чем в случае взрыва в газе. Поэтому УДА не сохраняется при взрыве заряда из ТГ50 в вакууме.

При разлете ПД в вакууме скорость ПД имеет линейный профиль с максимальным значением 7–8 км/с на границе ПД. Поэтому максимальные температуры в ПД достигаются на периферии при ударе ПД о стенку камеры.

Таким образом, вакуум в камере с одной стороны полезен, так как снижает нагрузку на стенки и устраняет кислород (предохраняет синтезируемый алмаз от окисления), но с другой стороны, вреден, т.к. увеличивает температуру ПД (алмаз графитизируется).

С целью максимального снижения температуры ПД, последние должны совершать работу по разгону не газа, а воды в виде капель, создаваемых душем в камере или в виде оболочки вокруг заряда (которая в процессе ускорения также быстро распадается на капли).

### 3.5. Определение несущей способности железобетонных взрывных камер

Под несущей способностью взрывных камер понимается предельная масса заряда данной конфигурации и состава, подрыв которого

не приводит к появлению пластических (остаточных) деформаций в стенке ВК.

Несущая способность данной ВК может быть определена либо расчетами, либо измерениями деформаций стенки ВК, проводимыми в процессе взрывных испытаний ВК с помощью тензорезисторов, наклеенных на наружную поверхность ВК в центральном сечении и на днищах.

Для проведения численных расчетов ВК используются различные пакеты прикладных программ, например, ADINA (США), LUSAS (Англия), DISK (Россия). Подобные программы описаны в [177,178]. Однако с помощью таких программ оболочку из бетона невозможно рассчитать, поскольку бетон практически не имеет прочности на растяжение. Об этом свидетельствуют результаты взрывных испытаний трехслойных камер сталь – бетон – сталь [179].

При нагружении бетон разделяется радиальными трещинами на отдельные блоки, толщина которых остается постоянной, а окружная деформация осуществляется за счет удаления блоков друг от друга.

Тем не менее, применение бетона удваивает несущую способность камер, испытанных в [179].

Очевидно, несущая способность стальных ВК повышается за счет увеличения массы стали, т.е. увеличения толщины стенок ВК, радиуса ВК, либо одновременно того и другого. Однако в связи с трудностями изготовления и транспортировки ВК обычно существуют определенные пределы максимально возможных массы и размеров сварных стальных ВК. (Например, масса 200–300 т и диаметр 4,5–5 м). Увеличить эти пределы можно, используя железобетон, поскольку слой железобетона вокруг ВК изготавливается после установки стальной ВК в стационарное рабочее положение.

По-видимому, такие конструкции ВК являются наиболее простым вариантом для цилиндрических камер большого диаметра и объема с несущей способностью более 40 кг, предназначенных, например, для синтеза и спекания алмаза.

Оценим несущую способность цилиндрических железобетонных камер [180].

Характеристики железобетона можно рассчитать следующим образом:

а) растяжение (принимаем, что работает только кольцевая арматура):

$$\sigma_s^* = \frac{F_{к.а}}{F_0} (\sigma_s)_{к.а}; \sigma_b^* = \frac{F_{к.а}}{F_0} (\sigma_b)_{к.а}; E^* = \frac{F_{к.а}}{F_0} E_{к.а}; \mu^* = \mu_0, \quad (3.10)$$

где  $\sigma_s^*$ ,  $\sigma_b^*$ ,  $E^*$ ,  $\mu^*$  – параметры железобетона; то же с индексом «к.а» – параметры кольцевой арматуры;  $F_{к.а}$  – суммарная площадь



сечения кольцевой арматуры;  $F_0$  — площадь сечения железобетона плоскостью, включающей в себя ось камеры;

б) сжатие (бетон деформируется упруго) [181]:

$$E_{сж}^* = \frac{V_a}{V_{жб}} E_a + \frac{V_б}{V_{жб}} E_б, \quad (3.11)$$

где  $V_a/V_{жб}$  и  $V_б/V_{жб}$  — коэффициенты объемного заполнения железобетона арматурой и бетоном.

Характеристики арматуры и бетона приведены в табл. 3.3 [180].

Т а б л и ц а 3.3. Механические характеристики арматуры, бетона и железобетона

Материал	$\sigma_s$ , кг/(м·с <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ , кг/(м·с <sup>2</sup> )	$\epsilon$ , %	$E$ , кг/(м·с <sup>2</sup> )	$\mu$	$E_{сж}^*$ , кг/(м·с <sup>2</sup> )	$\sigma_{сж}^*$ , кг/(м·с <sup>2</sup> )
Арматура	$4 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	14	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,28	—	—
Бетон марки 200	—	$1,5 \cdot 10^6$	1	$2,0 \cdot 10^{10}$	0,15	$2,9 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^7$
Железобетон	$8,3 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^7$	1	$4,2 \cdot 10^9$	0,15	$3,5 \cdot 10^{10}$	—

П р и м е ч а н и е: Расчет параметров железобетона по формулам (3.10), (3.11) сделан для  $F_{к.а} = 1,25 \text{ м}^2/\text{м}$  и расстояний между прутками арматуры 75 мм. Кроме того, для такого железобетона получено:  $\rho_{жб} = 2,3 \text{ г/см}^3$  и  $c_0 = 2,7 \text{ км/с}$ .

При взрыве в цилиндрических ВК удлиненных цилиндрических зарядов с различной погонной массой  $v_{вв}$  (кг/м) нагружение камеры одномерное, что упрощает расчеты несущей способности. Детонация считается мгновенной, при этом расчетный импульс немного завышается, поскольку не учитываются разлет ПД с торцев заряда и нерадиальность движения ПД.

Сообщаемый стенке ВК удельный импульс вычисляется согласно [176]:

$$J = 2 \frac{16 v_{вв} \sqrt{Q}}{27 \pi R_k}, \quad (3.12)$$

где  $Q$  — calorийность ВВ;  $R_k$  — внутренний радиус ВК.

Импульс, рассчитанный по (3.12), отличается не более чем на 15% от измеренного импульса и от импульса, полученного интегрированием расчетной зависимости  $p(t)$  для первого удара по стенке [180].

Основной отбор энергии железобетонной стенкой ВК происходит за время прохода ударной волной по стенке ВК. Далее стенка движется по инерции (сумма кинетической и потенциальной энергий постоян-

на), а давление компенсируется напряжениями в стенке. Вклад тонкой стальной внутренней оболочки в несущую способность ВК невелик.

Оценим несущую способность железобетонных ВК, используя энергетический подход [180].

Импульс взрыва сообщает единице длины стенки ВК следующую энергию:

$$\epsilon = \int_0^{2\pi R_k} \frac{J^2}{2 M_{уд}} dS = \left(\frac{64}{27}\right)^2 \frac{v_{вв}^* Q}{2 v_{жб}}, \quad (3.13)$$

где  $M_{уд} = \frac{v_{жб}}{2\pi R_k}$  — удельная масса железобетона;  $v_{жб}$  — погонная масса железобетонной стенки ВК.

При расчете максимально допустимой когонной массы заряда  $v_{вв}^*$  используется следующая одномерная модель железобетонной ВК:

1) стенка ВК состоит из ряда концентрических обечаяк (силовых слоев) с  $v_i$  и  $R_i$ , равным соответствующим слоям кольцевой арматуры;

2) все кольцевые обечайки соединены между собой бетоном и арматурой абсолютно жестко так, что радиальное смещение всех обечаяк одинаково независимо от их радиуса ( $u_i = \text{const}$ );

3) энергия, сообщаемая согласно (3.13) стенке ВК на единице ее длины, полностью преобразуется в энергию упругой деформации обечаяк при их максимальном смещении.

Таким образом, окружное напряжение  $i$ -й обечайки равно:

$$\sigma_i = E \epsilon_i = E u_i / R_i.$$

Поскольку  $u_i = \text{const}$ , то  $\sigma_i$  максимально для внутренней обечайки ( $R_i = R_k$ ), которая работает на пределе текучести. Тогда

$$u_i = \frac{\sigma_s R_k}{E}, \text{ а относительная деформация } i\text{-го слоя}$$

$$\epsilon = \frac{u_i}{R_i} = \frac{\sigma_s R_k}{E R_i}.$$

Суммарная энергия деформации всех слоев равна:

$$\epsilon = \sum \frac{\sigma_s^2}{2 E \rho_c} = v_i \left(\frac{R_k}{R_i}\right)^2, \quad (3.14)$$

где  $v_i$  — погонная масса  $i$ -го слоя;  $\rho_c$  — плотность слоя (арматурной стали).



Приравнивая (3.13) и (3.14), получим формулу для оценки максимально допустимой погонной массы заряда, взрыв которого не вызовет пластической деформации внутренней обечайки:

$$v_{\text{ВВ}}^* = \frac{27}{64} \sigma_s \sqrt{\frac{v_{\text{жб}}}{E \rho_c Q} \sum v_i \left( \frac{R_k}{R_i} \right)^2} \quad (3.15)$$

Как видно из (3.15),  $v_{\text{ВВ}}^* \approx \sqrt{v_{\text{жб}}}$ .

Расчетные значения  $v_{\text{ВВ}}^*$  на 10–20% меньше экспериментальных [180]. Кроме величин в (3.15), на  $v_{\text{ВВ}}^*$  в не меньшей степени влияет качество изготовления железобетонной ВК, прежде всего качество сварки, плотность и сплошность бетона. Кроме того, бетон должен быть покрыт внешней стальной оболочкой, поскольку разрушение бетона начинается с внешней поверхности (отколы, разрыхление).

### 3.6. Взрывные камеры для дробления алмаза и керамики

С ростом требований к качеству поверхности изделий электронной, оптической, ювелирной и др. отраслей промышленности растет и число случаев, когда серийные микропорошки алмаза не удовлетворяют потребителей. Неоднородность частиц порошков по дисперсности, морфологии, прочности, наличие в порошках игольчатых и пластинчатых кристаллов — все это создает недопустимые дефекты на обрабатываемой поверхности. Отсюда — необходимость создания прецизионных марок алмазных микропорошков.

Кроме того, традиционные мельницы (шаровые, электромагнитные, планетарные), используемые для дробления алмазного сырья при производстве микропорошков, имеют ряд существенных недостатков: малая производительность, малый выход мелких фракций, большой расход электроэнергии, большое загрязнение алмаза материалом мельющих тел, быстрый износ мельниц.

Для производства прецизионных микропорошков алмаза в ИПМ АН Украины (г. Киев) был опробован метод взрывного дробления алмаза. Этот метод позволяет управлять процессом дробления и лишен недостатков традиционных мельниц.

Кроме алмаза, целесообразно проводить взрывное дробление различных керамических порошков перед их спеканием. Как для инструментальной, так и для конструкционной керамики взрыв активизирует процесс спекания. В частности, значительно — до 400° снижается температура спекания, что позволяет получить керамику более мелкокристаллическую, а значит, более прочную.

Дробление алмаза с помощью взрыва в ИПМ было опробовано в трех конструктивных вариантах:

1) алмазное сырье смешивалось с порошком ВВ, и эта смесь в полиэтиленовом пакете взрывалась в обычной взрывной камере; алмаз загрязнялся продуктами взрыва и полиэтиленом, результаты плохо воспроизводились, были большие потери алмаза;

2) алмаз помещался в плоский контейнер, закрывался крышкой, на которой подрывался заряд ВВ; в этом способе увеличен расход ВВ, энергия которого использовалась неэффективно, крышка быстро разрушалась, при этом алмаз терялся;

3) для дробления алмаза использовалась цилиндрическая ампула сохранения с центральным стержнем. Недостатки такого метода: увеличение стоимости дробления из-за необходимости изготавливать ампулы, большой расход ВВ, большие потери алмаза при его извлечении из ампулы, неоднородность давления в ампуле.

Автором предложена, спроектирована и после изготовления опробована и запущена в эксплуатацию специальная взрывная камера, предназначенная только для дробления порошков алмаза и керамики [182]. Схема ВК показана на рис. 3.14. Несущая способность камеры — плоский заряд порошка гексогена массой до 200 г.

Для удобства работы камера может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. Основой конструкции ВК является цилиндрический стакан 2 из нержавеющей стали. Для прочности на стакан напрессованы стальные кольца 9. Стакан закрывается массивной крышкой 12 с уплотнением 11. Крышка фиксируется двумя полумуфтами 13 с коническими поверхностями, такими же, как у крышки и у фланца стакана.

Когда полумуфты стягиваются болтами 14, крышка прижимается к фланцу стакана. Если же полумуфты раздвинуть (они могут легко перемещаться по полкам 15 на колесиках 16), то крышка освобождается и может быть поднята ручной лебедкой. После этого камеру можно повернуть из вертикального положения в горизонтальное.

Внутри камеры между двумя массивными полуцилиндрами поддержки 8 устанавливаются два одинаковых неразрушаемых плоских контейнера 4 из прочной бронестали. В каждый контейнер засыпается предназначенный для дробления порошок 3 слоем толщиной 5 мм. Затем контейнеры закрываются стальными листами 6, толщина которых может изменяться в пределах 0,8–1,5 мм.

Между листами по оси камеры в картонной рамке 5 насыпается слой порошка гексогена 1, толщина которого может меняться в пределах 1–3 мм. В этом устройстве слой гексогена «работает» в обе стороны, разгоняя скользящей детонацией (от электродетонатора 7) сразу две пластины 6 и сжимая две навески порошка.



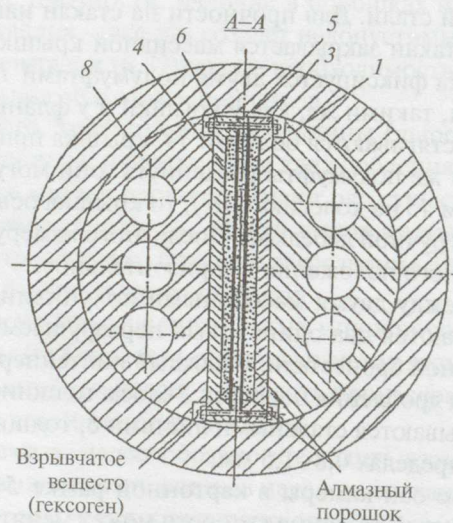
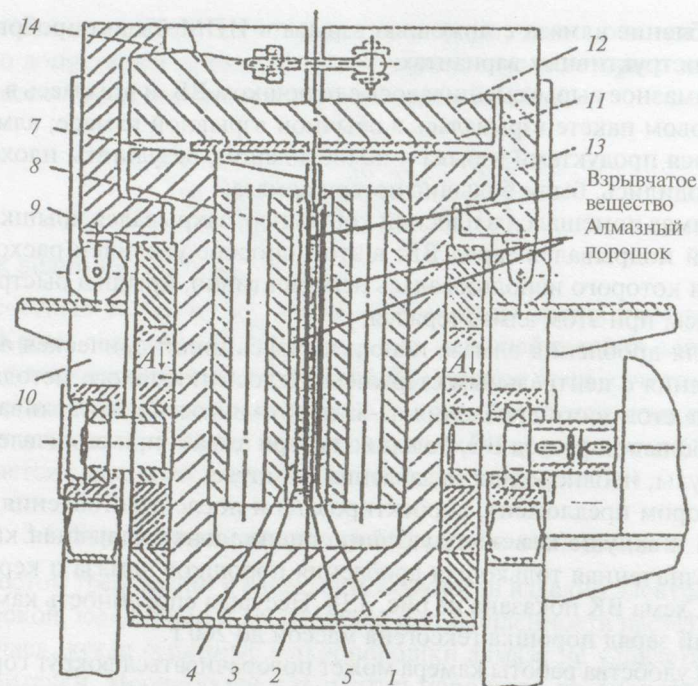


Рис. 3.14. Взрывная камера для дробления алмаза и керамики

Требуемая степень измельчения достигается изменением толщины стальных листов между ВВ и алмазом, а также толщины гексогена. Чем толще стальной лист и тоньше слой гексогена, тем меньше скорость сжатия порошка и степень его дробления.

При малых скоростях сжатия разрушаются только непрочные сродки, трещиноватые и дефектные частицы порошка. С ростом скорости дробятся практически все кристаллы. При скорости стального листа более 1,5 км/с зафиксирована частичная графитизация алмаза.

Производительность одной такой камеры — 1 кг алмазного или керамического сырья в час. Расход порошка гексогена — 100–150 г на 1 кг алмаза. Это в 20–30 раз меньше расхода ВВ при дроблении в ампулах сохранения. Кроме гексогена расходуются только пластины 6 и рамки 5.

В ИПМ АН Украины был создан производственный участок взрывного дробления алмаза с двумя взрывными камерами, описанными выше. Мощность участка такова, что при необходимости взрывом можно дробить все алмазное сырье, производимое на Украине.

Приведем некоторые результаты взрывного дробления порошков, полученные автором в 1993–1995 годах.

1. На участке проведено дробление нескольких партий различного алмазного сырья общим весом 0,2 млн карат, в том числе одной дефектной партии якутских алмазов пластинчатой формы (табл. 3.4–3.6).

Результаты дробления показали, что по данной технологии можно получать качественные как шлифпорошки, так и микропорошки алмаза, причем с хорошим выходом всех фракций.

Таблица 3.4. Результаты взрывного дробления алмазного сырья

Партия №1		Партия №2	
Фракция	Выход, %	Фракция	Выход, %
60/40	6,5	40/28	2,8
40/28	26,8	28/20	15,2
28/20	18,9	20/14	11,0
20/14	8,8	14/10	13,1
14/10	16,0	10/7	9,0
10/7	3,5	7/5	18,6
5/3	8,3	5/3	9,7
2/1	7,4	2/1	8,3
1/0	3,8	1/0	11,0



Таблица 3.5. Дробление якутских алмазов пластинчатой формы

Фракция	Прочность, $H$	Коэффициент формы зерна, $K_{\phi}$	Марка по СА	Марка по СА в результате дробления в цилиндрич. ампуле
400/315	76,5	1,18	АС 50	АС 20
315/250	45,4	1,23	АС 32	АС 20
125/100	9,0	1,33	АС 6	АС 6
80/63	9,2	1,37	АС 15	—

Таблица 3.6. Результаты гранулометрического анализа алмазных порошков

Вид порошка	Средний размер частиц, мкм	Содержание мелких фракций, %		
		< 2 мкм	< 6 мкм	< 10 мкм
<b>Партия № 3 (15 000 карат)</b>				
Исходный	43,5	0,5	1,0	1,0
Однократное дробление	6,9	31,6	47,8	55,3
Двухкратное дробление	1,0	71,8	88,7	91,7
<b>Партия № 4 (25 000 карат)</b>				
Исходный	68,7	0,5	1,3	1,7
Однократное дробление	3,3	42,5	60,7	71,4

Марки шлифпорошков, полученные при дроблении якутских алмазов, более высокие, чем при дроблении в ампулах сохранения (см. табл. 3.4).

В 1994 г. проведено дробление двух партий алмазного сырья, из них партия № 3 подверглась дроблению дважды, т.е. порошок после дробления снова закладывался в контейнеры и дробился без изменения режима дробления. Для исходного сырья и измельченных взрывом порошков алмаза был определен их гранулометрический состав (см. табл. 3.6). Измерения проводились с помощью фотометрического седиментографа SKC-2000 японской фирмы «Seishin».

Как видно, взрывное дробление резко увеличивает содержание наиболее дефицитных мелких фракций. Например, после однократного дробления примерно половина частиц имеет размеры менее 6 мкм, а после повторного дробления таких частиц в порошке алмаза уже около 90%.

2. Кроме производства алмазных микропорошков, представляет интерес исследование воздействия взрывного дробления различных

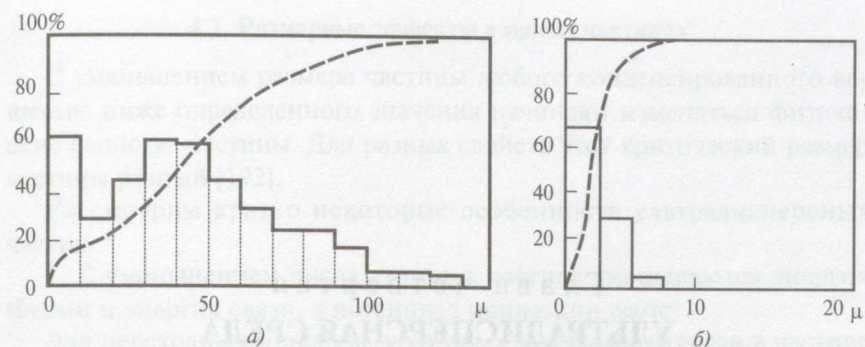


Рис. 3.15. Результаты гранулометрического анализа порошка  $Al_2O_3$  до (а) и после (б) взрывного дробления

керамических порошков на температуру и кинетику их спекания, а также на прочность получаемых спеканием керамических изделий.

Нами проведено взрывное дробление порошка  $Al_2O_3$ . На рис. 3.15 представлены для сравнения гранулометрические составы этого порошка до и после взрывного дробления. Как видно, и в этом случае достигается сильное измельчение: средний размер частиц уменьшился с 41,3 до 1,9 мкм, после дробления 97,8% частиц имеют размеры менее 6 мкм.