

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1975, 5.
2. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1977, 2.
3. Высокоскоростные ударные явления. М., Мир, 1973.
4. В. М. Титов, Ю. И. Фадеевко, Н. С. Титова. Докл. АН СССР, 1968, 180, 5.
5. H. F. Swift, D. D. Preonas, W. C. Turpin. J. Spac. Res., 1970, 7, 3.
6. Л. А. Мерзиевский, Ю. И. Фадеевко. Космические исследования, 1973, XI, 6.

НАГРУЗКИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЗРЫВАХ В ВОЗДУХОПОЛНЕННОЙ ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЕ

А. А. Бузуков
(Новосибирск)

В работе [1] показано, что при взрывах шпуровых зарядов ВВ в воздухополненной взрывной камере цилиндрической формы ее стенки совершают сложные колебательные движения. Наряду с начальной реакцией на действие ударной волны корпус камеры через несколько миллисекунд вновь начинает интенсивно деформироваться, причем амплитуда этих колебаний, как правило, существенно превышает первоначальную и может достигать опасных значений, вызывая механическую перегрузку конструкции. Причина появления такой вторичной деформации «раскачки» усматривалась в развитии резонансных явлений при сложении продольных и радиальных колебаний корпуса по нескольким гармоникам.

В [1] приведена также схема расчета амплитуды первичной радиальной деформации стенки камеры при действии на нее ударной волны от взрыва линейного заряда ВВ с использованием известных из литературы [2] эмпирических соотношений, описывающих газодинамические параметры ударной волны. Сравнение расчетных и экспериментальных значений относительной радиальной деформации для данной конструкции камеры показало, что если для зарядов ВВ весом до 25 г/м (1—2 нити детонирующего шнура в связке) наблюдается удовлетворительное согласие, то при взрыве более мощных зарядов измеренные значения деформации оказались на 20—40% ниже расчетных. Предполагалось, что это расхождение связано с рассредоточением заряда при соединении в связку нескольких нитей детонирующего шнура, уменьшением эффективной плотности заряда и соответствующим снижением параметров ударной волны [3].

Для выяснения причин появления деформации раскачки, а также причины расхождения экспериментальных и расчетных значений начальной деформации в случае взрыва мощных линейных зарядов ВВ проведена дополнительная серия экспериментов, в которой наряду с измерениями деформаций стенок взрывной камеры производилась запись эпюры давления в падающих на стенку ударных волнах, а также статического давления в камере, устанавливающегося после взрыва.

Описанию результатов этих экспериментов посвящена настоящая статья. Полученные данные могут оказаться полезными при разработке взрывных камер различных конструкций.

Методика эксперимента. Конструкция экспериментального стенда подробно описана в [1]. В настоящей серии опытов в камере производились взрывы связок нитей детонирующего шнура ДШ-А (10—11 г тэна на погонный метр) длиной два метра [4]. Заряды ВВ подвешивались по оси взрывной камеры, представлявшей собой цилиндрическую емкость длиной 2500, диаметром 800 и с толщиной стенок 10 мм.

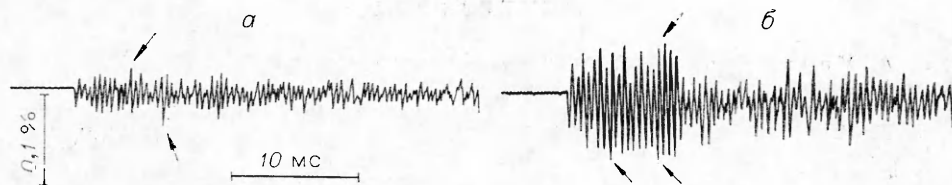


Рис. 1. Тензограммы радиальных перемещений стенок взрывной камеры цилиндрической формы при взрыве в ней связок из одной (а) и трех (б) нитей детонирующего шнура ДШ-А. Стрелками указаны моменты возбуждения деформации раскочки.

Система измерения деформаций практически не отличалась от использовавшейся ранее и позволяла с помощью тензометрического комплекса на ленте самописца фиксировать радиальные колебания стенок камеры. В описываемых экспериментах датчики деформаций устанавливались на корпусе камеры в среднем ее сечении, где наиболее хорошо выполняются условия цилиндрической симметрии явления. Как показали контрольные опыты, в точках, отстоящих от торцевых фланцев камеры на расстояния до 700 мм, на показания датчиков оказывают существенное влияние ударные волны, отраженные от дна и крышки.

Для записей эпюры нагрузки в корпус взрывной камеры в среднем ее сечении вмонтированы датчики давления, чувствительные элементы которых установлены на уровне внутренней поверхности стенки. Поэтому датчики регистрировали давление в отраженных от жесткой поверхности ударных волнах. В целях исключения влияния колебаний стенки на регистрацию сигнала датчики не имели с ней жесткого контакта, а укреплялись на массивной внешней стальной плите, не испытывавшей динамических нагрузок, и только их рабочие поверхности были введены в камеру через отверстия в стенке. Все датчики оснащались системой водяного охлаждения для ликвидации тепловых помех, возникающих от нагрева корпуса камеры при его деформации и контакте с продуктами детонации.

В опытах использовались датчики четырех типов. Для записи эпюры давления в первичной ударной волне, падающей на стенку камеры, применен датчик с чувствительным элементом из титаната бария, имеющий акустический демпфер и конструктивно выполненный по описанию в [5]. Сигнал с датчика поступал на высокоомный предусилитель и фиксировался на осциллографе С1-37. Длительность развертки луча осциллографа составляла около 2,5 мс. На двух осциллографах С1-35 с помощью промышленных пьезокварцевых датчиков типа ЛХ-601 записывались сигналы, создаваемые как первичной волной, так и многократно отраженными волнами. Длительность развертки лучей этих осциллографов составляла 10 и 50 мс. Все датчики тарировались на ударной трубе путем измерения скорости распространения ударной волны и последующего пересчета ее с помощью известных газодинамических соотношений на перепад давления на фронте волны.

Для измерения статического давления в камере использовался сильфонный датчик с реостатным элементом, включенным в мостиковую схему предусилителя. Сигнал записывался на низкоскоростном осциллографе С1-19Б, длительность развертки луча составляла 10 с. Включение всех систем записи деформации и давлений, а также подача импульса на инициирование заряда ВВ синхронизировались с помощью блока автоматического управления экспериментом. Поскольку от опыта к опыту разброс показаний датчиков давления достигал 20%, а записей датчиков деформаций 30%, то опыты дублировались 5—6 раз и в настоящей работе результаты приведены усредненными по всем экспериментам.

Радиальные деформации стенок взрывной камеры. Типичные осциллограммы тензометрических записей радиальных деформаций стенок

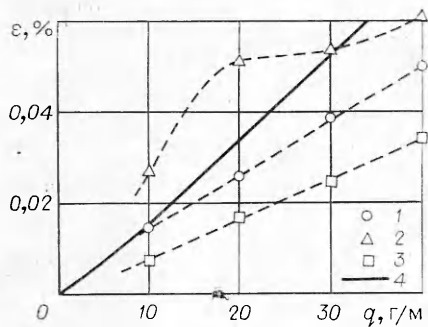


Рис. 2. Значения радиальной относительной деформации стенок взрывной камеры.

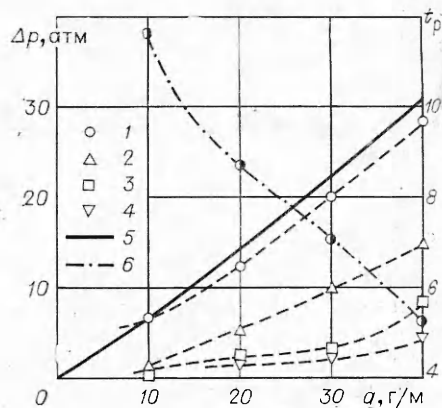


Рис. 3. Время появления деформации раскочки t_p (мс) и амплитуда нагрузки на стенку взрывной камеры.

взрывной камеры в среднем ее сечении приведены на рис. 1. Измерения показывают, что сразу же после прихода воздушной ударной волны к стенке камеры она подвергается первичной деформации, амплитуда которой практически линейно растет с увеличением погонной массы заряда. На рис. 2, 1 приведены результаты измерения максимальной радиальной относительной деформации ϵ_1 стенок взрывной камеры при первой пульсации. Измеренное значение ϵ_1 для зарядов, состоящих из одной или двух нитей ДШ-А, близко к расчетному (рис. 2, 4), полученному из соотношения (9) в [1]. Однако для более мощных взрывов измеренные значения на 20—30% ниже расчетных. Если же обратиться к работе [1], то это расхождение для случая взрывов пяти или шести нитей ДШ-В оказывается еще более значительным.

В начальный период колебаний стенок камеры носят регулярный синусоидальный характер с частотой около 2 кГц, что соответствует основному тону радиальных колебаний корпуса данной конструкции. При мощных взрывах (3—4 нити ДШ-А) на колебания основного тона накладываются высокочастотные, однако их амплитуда в течение первых 5—10 мс относительно невелика. С течением времени, когда колебания основного тона начинают затухать, колебания высших гармоник становятся более заметными и их амплитуда возрастает, что, очевидно, связано с переходом энергии колебаний основного тона в высокочастотные. Это может быть объяснено наличием неоднородностей по окружности корпуса камеры (фланцы, технологические отверстия, неоднородность толщины стенок и т. д.), а также незначительной расцентровкой заряда ВВ.

Существенно, что через несколько периодов после появления первого всплеска деформации амплитуда колебаний стенок камеры начинает практически во всех случаях возрастать и через 5—10 мс достигает максимума (на рис. 1 отмечено стрелками). Причем нарастание этой деформации, как показывают осциллограммы, происходит скачкообразно и может повторяться так, как если бы стенки камеры испытывали последовательные удары. Такое явление раскочки корпуса наблюдается во всех его сечениях, однако вблизи торцевых фланцев амплитуда вторичных деформаций в среднем меньше, чем в центральной части корпуса, и появляется она раньше. На рис. 2, 2 представлены измеренные значения максимальной относительной деформации раскочки ϵ_p , а на рис. 3, 6 — время появления этого всплеска деформаций t_p , отсчитанное с момента прихода первичной ударной волны к стенке камеры. Появление раскочки наблюдается при взрыве любых зарядов ВВ (в том числе и сосредоточенных), однако наибольшее превышение ее амплитуды над

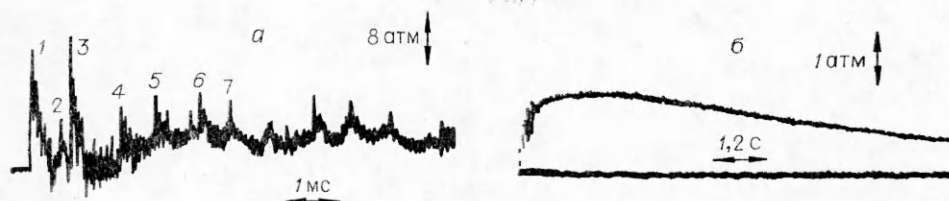


Рис. 4. Эпюры нагрузки на стенки взрывной камеры при взрыве связки из трех нитей ДШ-А.

значением деформации от первичного импульса нагрузки оказывается при взрыве 2—3 нитей ДШ-А в связке. Время же возникновения деформации раскачки с увеличением мощности взрыва сокращается.

После затухания колебаний стенок камеры (0,5—0,7 с) можно, измеряя смещение луча гальванометра, определить статическое давление в камере, устанавливающееся после взрыва. На рис. 2, 3 приведены значения радиальной статической относительной деформации ϵ_r (масштаб 10:1), измеренной через одну секунду после взрыва. К этому моменту стенки еще не успевают сколь-нибудь существенно прогреться при контакте с продуктами детонации. В то же время продукты взрыва за счет конвективных токов уже в значительной мере перемешиваются с воздухом, наполняющим камеру, и внутри нее давление можно считать установившимся.

Воспользовавшись очевидным соотношением, связывающим радиальную относительную деформацию стенок цилиндрического сосуда со статическим давлением в нем, из эксперимента получаем, что избыточное статическое давление в камере при взрыве одной нити ДШ-А составляет 0,41 атм, двух — 0,89 атм, трех — 1,34 атм и четырех — 1,78 атм.

Динамические и статические нагрузки на стенки взрывной камеры при взрыве в ней шнуровых зарядов ВВ. На рис. 4, а представлена типичная осциллограмма нагрузок, действующих на стенку взрывной камеры в среднем ее сечении при взрыве связки из трех нитей ДШ-А, записанная в одном опыте. Из приведенной осциллограммы видно, что после прихода головной ударной волны к стенке камеры (см. рис. 4, 1) через 0,6—0,7 мс на нее действует следующий импульс давления относительно небольшой интенсивности — 25—30% от величины пика нагрузки первичной волны. Момент его появления показан на рис. 4, 2. Образование этой волны объясняется процессом пульсации цилиндрической области, занятой продуктами детонации, после излучения ею первичной ударной волны [2]. Как время появления этого импульса давления, так и его интенсивность зависят от мощности взрыва.

Существенно, что примерно через 1 мс (для связки из трех нитей ДШ-А) стенка камеры испытывает вторичный мощный удар следующей ударной волны, которая образуется после отражения первичной (см. рис. 4, 3). Ее интенсивность сравнима с интенсивностью первичной, а в некоторых опытах, как это представлено на осциллограммах, даже превышает ее. Очевидно, что характеристики этой волны и время ее прихода на стенку также зависят от мощности взрыва.

Осциллограмма рис. 4, а показывает, что почти 10 мс стенка камеры подвергается действию последовательных достаточно мощных импульсов давления с постепенно уменьшающейся амплитудой. В ряде случаев, особенно при взрыве больших зарядов ВВ, приходилось наблюдать до десяти заметных по амплитуде импульсов давления, время между появлениями которых соответствует времени пробегания ударной волной диаметра цилиндрического корпуса камеры.

В связи с тем, что появление серии отраженных ударных волн, обладающих большой интенсивностью, вынуждает учитывать их влияние на динамику деформаций корпуса, предпринято измерение усредненных

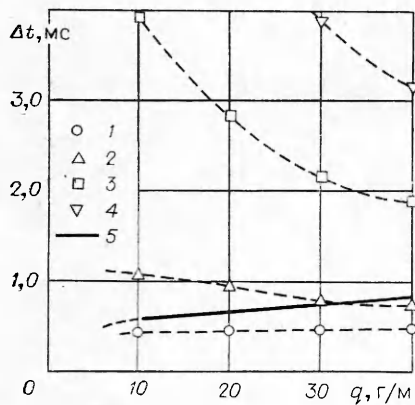


Рис. 5. Измеренное время действия положительной фазы давления в ударной волне, падающей на стенку взрывной камеры (1), и моменты прихода на стенку вторичной и последующих отраженных ударных волн (считая с начала действия нагрузки).

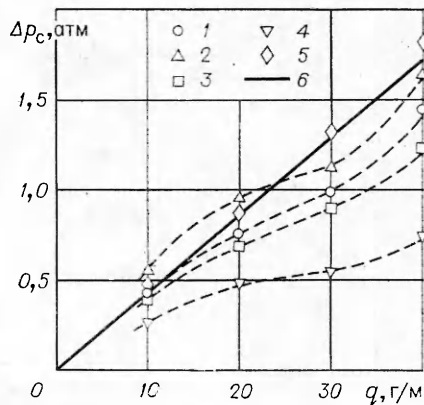


Рис. 6. Избыточное статическое давление, устанавливающееся во взрывной камере через следующее время после взрыва, с:

1 — 0,5; 2 — 2; 3 — 5; 4 — 10; 5 — 1 (тензометрирование); 6 — расчетное значение $\sqrt{\Delta P_c}$ после взрыва.

амплитуд этих волн и времени их появления в зависимости от мощности взрыва. На рис. 3 представлены измеренные значения давления в падающей на стенку начальной ударной волне 1, вторичной 2 и в последующих отраженных волнах 3, 4. На рис. 3, 5 изображена зависимость давления в отраженной от жесткой стенки волне в случае взрыва цилиндрического заряда ВВ, рассчитанная по формулам (1)–(4) в работе [1]. Данные свидетельствуют о достаточно хорошем совпадении расчетных и экспериментальных результатов. Определенный разброс можно отнести за счет неравномерности распределения заряда ВВ по длине шнура, различного сплетения нитей, расцентровки положения связки. Однако усредненные по большому количеству опытов данные дают хорошее совпадение.

В отличие от указанного выше совпадения расчетных и измеренных значений амплитуды давления в первичной ударной волне, измерения времени действия положительной фазы давления в этой волне показали существенное различие с расчетными значениями (рис. 5, 5), полученными с использованием зависимости (3) из [1]. Если для заряда ВВ, сформированного из одной нити ДШ-А, значения расчетного и измеренного времени действия положительной фазы давления в первичной ударной волне Δt_1 еще близки, то при увеличении мощности заряда до четырех нитей в связке получаем двукратное уменьшение фактического времени действия первого импульса нагрузки по сравнению с расчетным. Причиной столь резкого расхождения может являться то, что формулы, описывающие параметры в ударной волне, в работе [2] получены для проходящих волн, а не для отраженных. В то же время известно, что время действия нагрузки на преграду в случае нормального падения ударной волны меньше, чем длительность действия положительной фазы давления в этой волне [6]. Кроме того, формула (3), использованная в работе [1] для расчета Δt_1 , как указывалось, получена путем экстраполяции зависимости в область более близких к заряду расстояний, где непосредственные измерения в [2] не проводились. Поэтому здесь возможным оказалось некоторое завышение расчетных значений Δt_1 для сравнительно мощных взрывов.

Следует обратить внимание также и на то, что время появления повторных (отраженных) ударных волн для взрыва зарядов различной

массы сильно отличается, что связано с зависимостью скорости их распространения от интенсивности. На рис. 5 приведены зависимости времени прихода второй, третьей и четвертой волн. Отметим, что в случае взрыва одной или двух нитей ДШ-А вторичная волна приходит через 1 мс после первичной, поэтому стенки камеры попадают при своих колебаниях в резонанс с этими нагрузками. В то же время при взрыве трех или четырех нитей время появления вторичной волны, составляющее 0,7—0,8 мс, не является кратным периоду колебаний стенок камеры.

На рис. 4, 6 приведена запись датчика статического давления в камере при том же взрыве связки из трех нитей ДШ-А. Датчик статического давления инерционен и практически не реагирует на импульсные нагрузки, возникающие при действии на него начальной и серии отраженных волн. Поэтому в течение 0,2—0,3 с после того, как процессы распространения волн прекратятся, он начинает показывать установившееся избыточное давление в камере. В течение 1,5—2 с давление продолжает возрастать и увеличивается по сравнению с первоначальным на 15—20%, а затем постепенно спадает. Такой характер изменения давления при взрыве зарядов различного веса одинаков. Через 10 с после взрыва статическое давление составляет лишь 30—40% от максимального. Возрастание давления в начальный период времени связано с тем, что за счет конвективного движения горячие продукты детонации, вначале занимавшие центральную часть камеры, успевают смешаться с холодным воздухом. Происходит выравнивание температуры и вследствие этого некоторое повышение давления. Спад же давления, который начинается после периода перемешивания газов, связан с их охлаждением за счет теплопередачи на стенки камеры.

На рис. 6 показано избыточное статическое давление Δp_c в различные моменты времени. Эти данные близки к измеренным датчиком статического давления. Такую оценку легко получить, подсчитывая дополнительное количество газообразных продуктов, образующихся при взрыве, и количество выделяющейся тепловой энергии. Здесь также наблюдается хорошее совпадение результатов.

Выводы и обсуждение. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что основной причиной развития деформации раскочки является образование следующих друг за другом многократно отраженных ударных волн. И чем «качественнее» осевая симметрия явления, тем более четко реализуется режим регулярных интенсивных импульсных нагрузок на стенки взрывной камеры. Нелинейность зависимости максимальной деформации раскочки от мощности взрыва объясняется тем, что при некоторых условиях оказываются близкими интервалы времени между импульсами нагрузок и период колебаний корпуса, что способствует нарастанию деформаций раскочки.

Полученная в опытах качественная информация о наличии многократно отражающихся от стенок ударных волн при взрыве в замкнутом объеме не является неожиданной. Однако значительные количественные характеристики этого явления вынуждают более осторожно подходить к проблеме расчета на прочность корпусов взрывных камер и других конструкций такого рода. Очевидно, что расчет корпуса на действие головной ударной волны с известными газодинамическими характеристиками и на статическую нагрузку не составляет особого труда и может обеспечить соответствующую конструкторскую разработку. Наличие же неоднократно повторяющихся импульсных нагрузок большой интенсивности практически может свести на нет результаты такого расчета. Особую значимость приобретает сопоставление частотных спектров таких нагрузок и колебаний элементов конструкций. Очевидно, что резонансные явления в этих условиях должны стать предметом особого внимания.

Во всех экспериментах, результаты которых представлены в настоящей статье, линейный заряд располагался по оси камеры. Это обстоятельство является одним из обязательных факторов, обеспечивающих осевую симметрию газодинамических течений. Поэтому в отдельных опытах удавалось, как указывалось выше, регистрировать до 10 достаточно мощных последовательных отраженных ударных волн. Контрольный эксперимент, в котором связка из трех нитей детонирующего шнура на 15 см смещена с оси камеры в сторону панели с датчиками давления, показал следующее. Хотя интенсивность головного импульса нагрузки и возросла, но 3—4 последующих оказались существенно меньшей амплитуды и потеряли свою регулярность. Уменьшилась на 15—20% и максимальная деформация раскочки.

Таким образом, результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что снижение эффекта «раскочки» корпуса камеры и связанных с ней перегрузок может быть достигнуто и путем конструктивного обеспечения несовпадения собственной частоты колебаний корпуса камеры с частотой прихода отраженных ударных волн, и путем запланированного выведения заряда из центра осевой или сферической симметрии корпуса. В последнем случае, естественно, следует предусмотреть возможность кумуляции ударных волн и появления локальных нагрузок на отдельные элементы конструкции, вызванных этим явлением. Опыты показали также, что расчет начальной деформации корпуса камеры по методике, изложенной в [1], может оказаться более точным для случаев взрыва предельных для данной конструкции зарядов, если учитывать нелинейное изменение временных характеристик ударных волн при их отражении от жесткой поверхности и, в частности, криволинейного профиля.

Следует заметить, что все эксперименты как в [1], так и в настоящей работе выполнены на воздушнонаполненной взрывной камере цилиндрической формы, но является очевидным, что качественные выводы, полученные в этих исследованиях, в равной степени относятся к взрывным камерам любых конструктивных форм. Более того, эти же выводы могут быть распространены и на вакуумированные взрывные камеры, так как разлет продуктов детонации и удар их о стенки корпуса неминуемо вызывают возникновение серии волн сжатия и разрежения, приводящих к созданию пульсирующих нагрузок. Естественно, что в этом случае их частотные и силовые характеристики будут отличаться от представленных в настоящей работе.

В заключение автор выражает признательность В. И. Якушеву и Н. Т. Гомаюну за помощь в проведении эксперимента.

*Поступила в редакцию
5/II 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Бузуков. ФГВ, 1976, 12, 4, 605.
2. М. А. Цикулип. ПМТФ, 1960, 3, 188.
3. Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 1961, 6, 175.
4. Б. Я. Светлов, Н. Е. Яременко. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М., Недра, 1966.
5. Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1960, 2, 90.
6. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., Наука, 1971.