

4. Е. А. Дыпин. ФГВ, 1983, 19, 1, 111.
5. М. А. Могилевский. ВИНТИ, № 2830 — 80 Дел.
6. L. D. Chabildas, J. R. Assy. J. Appl. Phys., 1979, 50, 4, 2749.
7. Л. А. Мерзиевский, С. А. Шамонин. ПМТФ, 1980, 5, 170.
8. G. R. Cowan. Trans. Met. Soc. AIME, 1965, 233, 6, 1120.

Поступила в редакцию 13/V 1986

ВОЗДУШНЫЕ УВ ПРИ ВНЕЗАПНОМ РАСШИРЕНИИ СЖАТОЙ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ

С. П. Медведев, А. Н. Поленов, Б. Е. Гельфанд, С. А. Цыганов

(Москва)

Широкое распространение в промышленности производства, переработки и транспортирования пылевых и гранулированных материалов ставит перед газодинамикой двухфазных сред задачу максимальной оптимизации и интенсификации соответствующих технологических решений. В связи с этим одной из актуальных является проблема взрывобезопасности аппаратов и установок, в которых в качестве рабочего тела используется среда типа газ — твердые частицы с большой объемной долей твердой фазы в смеси. Для выяснения характера взрывных процессов в пылевых средах и оценки последствий таких процессов необходимо ясное понимание динамики взаимодействия частиц и газа, заполняющего промежутки между частицами в отсутствие энерговыделения в системе. Среди прочих представляется достаточно важной задача о параметрах волн давления, которые могут возникнуть в окружающей среде в результате аварийного разрыва сосудов, заполненных высоконапорной концентрированной взвесью твердых частиц в газе.

В [1] сообщались предварительные сведения об измерениях параметров плоских ударных волн (УВ), возбуждаемых в воздухе при разлете сжатого объема аэровзвеси с умеренной концентрацией частиц в газе (300—400 кг/м³). Оказалось, что при одинаковом перепаде давления между сжатой и невозмущенной средой при разлете аэровзвеси в последней генерируются волны меньшей интенсивности, но большей длительности, чем при расширении газа. Разумно предположить, что отмеченные в [1] эффекты усиливаются с ростом объемной доли частиц в сжатой смеси. Для проверки таких предположений представлялось уместным на основе методики, предложенной в [1], измерить параметры плоских УВ при внезапном расширении сжатой среды насыпной плотности. Двухфазная среда насыпной плотности представляет собой образец систем с предельной объемной концентрацией дисперсной твердой фазы. При постановке опытов предполагали, что измерение параметров УВ на различных расстояниях от разорвавшегося объема, установление влияния размера частиц сыпучей среды, а также геометрических характеристик сжатого объема на параметры волн давления имеет не только научное, но и важное прикладное значение.

Поставленная задача представляет, по-видимому, самостоятельный интерес для вопросов безопасности широко распространенных систем пневмотранспорта сыпучих грузов. В промышленных установках транспортировки дисперсных материалов с помощью сжатого газа (обычно воздуха) рабочее давление достигает 0,6—0,8 МПа [2] при размерах частиц сыпучей среды 0,01—10 мм. В последнее время разрабатываются [3] системы пневмотранспорта при высоком давлении — до 1,5 МПа. Область применения — трудносыпучие среды высокой концентрации и удельной плотности (например, подача руды в конверторы). Тенденция повышения давления газа, видимо, будет сохраняться, и, следовательно, возрастает необходимость понимания физических процессов при возможном аварийном разрыве запыленных сосудов высокого давления.

Вещество	ρ_p , г/см ³	ρ_n , г/см ³	β	d_0 , мм
Песок 1	2,45	1,78	0,73	0,2
Песок 2	2,40	1,72	0,72	0,9
Гранулы по- лиэтилена	0,82	0,55	0,67	4,5

Эксперименты проводили на установке, описанной в [1]. В камеру высокого давления (КВД) ударной трубы помещали среду насыпной плотности. Характеристики исследуемых веществ приведены в таблице. Приняты обозначения: ρ_p — плотность материала частиц и ρ_n — насыпная плотность, β — объемная доля твердой фазы, d_0 — средний размер частиц после ситовой отборки. При фиксированном давлении p_0 газа, заполняющего промежутки между частицами, разрывалась мембрана, отделяющая КВД от камеры низкого давления (КНД), и в КНД формировалась УВ. Ее параметры измерялись на расстоянии H от мембраны: $H/l_0 \gg 1$ (l_0 — длина КВД). Известно, что при $H/l_0 \gg 1$ в ударной трубе формируются волны треугольного профиля со спадающим давлением за фронтом волны. Такое изменение давления характерно для воздушных УВ, образующихся в открытом пространстве при взрыве зарядов ВВ [4, 5], а также на больших расстояниях при разлете сферического газового объема высокого давления [6]. Целесообразно охарактеризовать плоские волны треугольного профиля в ударной трубе параметрами, аналогичными [4—6]. К ним относятся избыточное давление на фронте Δp_+ , время действия τ_+ и удельный импульс фазы сжатия ударной волны I_+ .

Измерения производили пьезоэлектрическими датчиками давления типа ЛХ с собственной частотой 30 кГц, откалиброванными ударными волнами с постоянными параметрами за фронтом. Особенность их работы состоит в наличии как значительной пульсации на фронте, так и наложения на профиль давления за фронтом высокочастотных колебаний (так называемого «дребезга» датчика) с амплитудой до 30% максимальной величины полезного сигнала. Первая пульсация давления, не отвечающая известным газодинамическим соотношениям на фронте УВ, не рассматривалась. В случае УВ треугольного профиля за истинную величину Δp_+ принималось усредненное по «дребезгу» давление за фронтом и продолженное к моменту прихода фронта по известной методике [6]. Ошибка измерения Δp_+ в опытах не превышала 15%.

Эксперименты проводили на ударной трубе круглого сечения диаметром $D = 5$ см. Использовались КВД с $l_0 = 1,5; 7$ и 13 см. В случае $l_0/D \leq 1$ время пробега волны разрежения по длине КВД сравнимо с временем раскрытия мембраны [7], что может влиять на характер изменения давления в КНД. В частности, при $l_0 = 1,5$ см оказалось, что момент окончания фазы сжатия за фронтом УВ не всегда совпадал с моментом появления фазы разрежения в отличие от известных результатов для идеальных точечных взрывов. Варьирование постоянной времени тракта измерения давления с помощью предусилителей и повторителей с высоким входным сопротивлением и емкостью в диапазоне 33—120 мс (характерное время процесса $\tau_+ \leq 4$ мс) показало, что данный эффект не является результатом приборной ошибки, а определяется газодинамикой течения в ударной трубе. В связи с этим за величину τ_+ принималось время спада давления от значения Δp_+ на фронте волны до исходного давления в невозмущенном газе, которое могло не совпадать с моментом появления фазы разрежения. Ошибка измерения τ_+ , определяемая характерным временем процесса и постоянной времени системы регистрации давления, не превышала 15%. Сигналы пьезодатчиков записывались осциллографами С8-13 и С8-17.

В предварительных экспериментах по разлету насыпной среды исследовался вопрос о возможности искажения записи давления за счет ударов твердых частиц о поверхность датчика. С помощью чувствительных фотозаписывающих элементов проведена визуализация движения границы сыпучей среды в процессе ее расширения из КВД. Установлено, что в диапазоне $p_0 = 0,6 \div 5$ МПа граница насыпной среды движется со скоростью, мень-

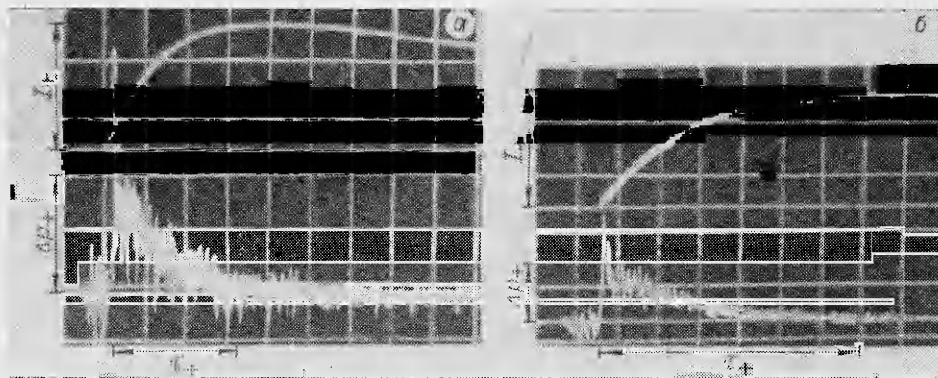


Рис. 1. Типичные осциллограммы записи давления и I_+ в КВД; $l_0 = 1,5$ см. Масштабы: горизонтальная шкала — 0,5 мс/дел; вертикальная шкала: датчик — 0,1 МПа/дел, интегратор — 50 Па·с/дел. В камере азот (а) и азот + песок 1 (б).

шей скорости фронта УВ, и на измерительной базе отстает от фронта на 10—15 мс. Следовательно, непосредственное влияние частиц на регистрируемый профиль давления отсутствовало.

По измерениям и площади осциллограммы под кривой $\Delta p = \Delta p(t)$ вычислялся удельный импульс фазы сжатия УВ

$$I_+ = \int_0^{\tau_+} \Delta p(t) dt.$$

В части опытов наряду с методом непосредственного определения площади под кривой $\Delta p = \Delta p(t)$ использовался электронный интегратор сигнала пьезодатчика, собранный на операционных усилителях с постоянной времени интегрирующего звена не ниже 60 мс. Значения I_+ , полученные двумя способами, совпадали с точностью 5—10%. Входные параметры интегратора подбирались таким образом, чтобы обеспечить общую постоянную цепи измерения давления и импульса не ниже 33 мс, а в отдельных случаях до 120 мс.

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы записи давления (нижние лучи на осциллограммах) и импульса (верхние лучи) датчиком, расположенным на расстоянии 0,45 м от мембраны. В КВД азот при $p_0 = 3,5$ МПа, в КВД воздух при 0,1 МПа. Видно, что в случае разлета двухфазной среды насыпной плотности (рис. 1, б) в отличие от разлета газа (рис. 1, а), как и в [1], формируются волны меньшей интенсивности, но большей длительности. Импульсы фазы сжатия различаются незначительно. На записи давления рис. 1, а фаза разрежения появляется приблизительно через 2,5 мс после прихода фронта УВ, а $\tau_+ \approx 1,5$ мс, что является следствием упомянутых выше эффектов. На рис. 1, б фаза разрежения отсутствует, однако в контрольных экспериментах с большими временами развертки осциллографа установлено, что картина течения аналогична рис. 1, а.

В выполненных опытах не ставилась задача полного описания газодинамики течения при формировании в ударной трубе плоских УВ с треугольным профилем изменения давления за фронтом. Основное внимание уделялось иллюстрации различий в волновом процессе при замене газа в КВД на двухфазную среду. Приведенные ниже зависимости характеризуют изменение основных, практически важных параметров УВ при такой замене и, по-видимому, не зависят от конструктивных особенностей конкретной установки.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости избыточного давления на фронте УВ от расстояния до мембраны. Во всех опытах мембрана разрывалась при $p_0 = 3,5 \pm 0,2$ МПа; $l_0 = 1,5$ см. Каждая точка на рис. 2 соответствует 2—5 экспериментам. Видно, что при разлете

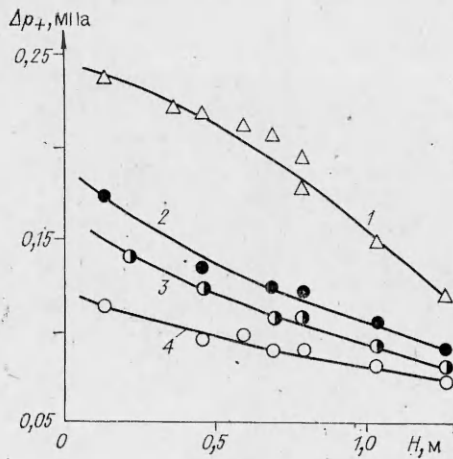


Рис. 2. Изменение Δp_+ с расстоянием до мембраны в КВД.

1 — азот; 2 — азот + гранулы полиэтилена; 3 — азот + песок 2; 4 — азот + песок 1.

сжатой двухфазной среды в КВД формируются волны значительно меньшей интенсивности, чем в случае разлета газа. С уменьшением размера частиц насыпной среды амплитуда УВ снижается. Что касается времени действия фазы сжатия, то здесь наблюдается обратная тенденция — величина τ_+ больше, чем при разлете чистого газа, и увеличивается с уменьшением размера частиц.

В связи с тем, что при переходе к двухфазной среде в КВД Δp_+ убывает, а τ_+ возрастает, то только на основании измерений избыточного давления на фронте и времени действия фазы сжатия нельзя сделать окончательных выводов относительно третьего параметра, определяющего разрушительную силу ударной волны — удельного импульса фазы сжатия. На рис. 3, а показано изменение величины I_+ для условий эксперимента рис. 2 в зависимости от расстояния до мембраны. Видно, что в пределах ошибки измерений (10—20%) в случае разлета двухфазной среды насыпной плотности импульс фазы сжатия УВ не зависит от размера частиц (в диапазоне $d_0 = 0,2 \div 4,5$ мм). Как и в случае разлета чистого газа, I_+ слабо изменяется с расстоянием (при $H = 10l_0 \div 100l_0$ импульс уменьшается приблизительно на 30%) и составляет около 80% импульса фазы сжатия при расширении газового объема.

Представляет интерес соотношение импульсов УВ при разлете газа и двухфазной среды при изменении геометрических характеристик сжатой системы, например l_0 . Для выяснения этого вопроса проведены эксперименты при $l_0 = 7$ и 13 см. Результаты этих опытов, а также данные для $l_0 = 1,5$ см приведены на рис. 3, б. Во всех экспериментах $p_0 = 3,5 \pm 0,2$ МПа. Представляется, что после образования в ударной трубе волны треугольного профиля давления ее дальнейшее распространение в основном определяется общей протяженностью возмущенной области в КВД, по сравнению с которой длина КВД мала. Поэтому влияние геометрических характеристик сжатого объема предпочтительнее рассматривать не в относительных переменных H/l_0 , а пока отсутствуют критерии моделирования, соотносить это влияние с абсолютными зна-

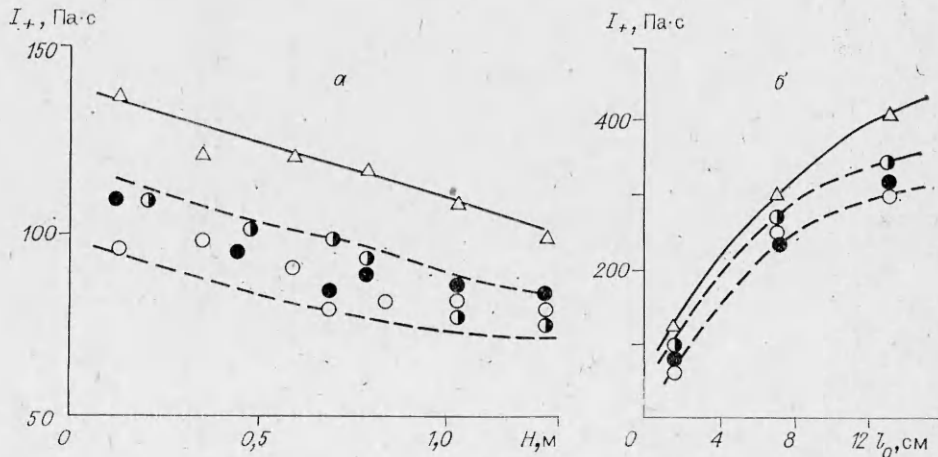


Рис. 3. Зависимость I_+ от H (а) и l_0 (б) (обозначения аналогичны рис. 2).

чениями расстояния до разорвавшегося объема. По этой причине измерения проведены на расстоянии 0,79 м для всех l_0 . С увеличением l_0 удельный импульс фазы сжатия растет, а указанная выше тенденция сохраняется — значение I_+ в случае разлета двухфазной среды высокого давления составляет около 80% импульса УВ в случае разлета газа такого же начального давления.

Таким образом, несмотря на значительные различия в амплитудах и длительностях УВ при разрыве объемов высокого давления с газом и средой насыпной плотности (для песка 1, например, Δp_+ в 2—2,5 раза меньше, а τ_+ в 2 раза больше соответствующих величин для газа), удельный импульс фазы сжатия отличается весьма слабо. Аналогичное явление наблюдается при взрыве в воздухе реакционноспособного газового объема [8].

Авторы выражают благодарность М. Ф. Пышному за консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Е. Гельфанд, А. В. Губанов, С. П. Медведев и др. Докл. АН СССР, 1985, 281, 5, 1113.
2. А. И. Матвеев. Состояние и перспективы развития оборудования систем пневмотранспорта. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1975.
3. A. R. Godfrey. Bulk Storage, Mov. Contr., 1975, 5, 6, 41.
4. М. А. Садовский. — В кн.: Физика взрыва. № 1. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
5. В. В. Адушкин, А. М. Коротков. ПМТФ, 1961, 5, 119.
6. W. E. Baker e. a. Explosion hazards and evaluation. Elswior, 1983.
7. Т. В. Баженова, Л. Г. Гвоздева. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977.
8. R. W. Strehlow, T. R. Luckritz, A. A. Adamczik e. a. Comb. Flame, 1979, 35, 3, 297.

*Поступила в редакцию 23/IV 1985,
после доработки — 10/VII 1986*