

**ПРИМЕНЕНИЕ
СУЛЬФАТ-ЛИТИЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

*М. К. Березкина, И. В. Плогников
(Ленинград)*

При взаимодействии ударных волн между собой и воздействии их на преграды возникают сложные волновые процессы, расчет которых не всегда возможен. Для исследования таких процессов обычно проводят эксперименты, моделируя явление. При этом изучается динамика волновой структуры течения, возмущенного преградой, выясняются основные факторы, определяющие эту динамику, а также исследуется характер нагружения отражающей поверхности во времени и оцениваются пиковые нагрузки.

В настоящее время для подобного рода работ широко применяются ударные трубы. Волновые картины течения, возникающие около моделей — преград, регистрируются оптическими методами, а для измерения давления на их поверхности используются измерительные преобразователи давления.

Существующие конструкции преобразователя, используемые для измерения импульсных давлений в ударных трубах [1, 2], как правило, съемные. Это приводит к увеличению их размеров, понижению частоты собственных колебаний вследствие ограниченной жесткости крепления, к наличию установочных зазоров вблизи точки измерения и неровностей на приемной поверхности. Следует учитывать также, что все типы преобразователей давления обычно обладают чувствительностью к сопровождающим импульсные процессы ударным ускорениям и деформациям объекта.

В данной работе для устранения причин, препятствующих улучшению динамических свойств преобразователей давления, предлагается схема встроенного в модель измерительного преобразователя с применением пьезоэлементов из сульфата лития моногидрата. При этом можно уменьшить их размеры до 1—3 мм и менее, а также устранить неровности, полости, маложесткие элементы резьбовых и иных креплений преобразователей на модели.

Использование в качестве чувствительного элемента сульфата лития, для которого характерны малые значения поперечных пьезомодулей по отношению к продольным, позволяет значительно снизить влияние деформаций объекта. Опыт применения сульфата лития для измерения давления в ударных волнах в воде и воздухе показал хорошие результаты [3].

Эффективность применения встроенного сульфат-литиевого измерительного преобразователя давления (ПДСЛ) определялась при исследовании динамики волновых процессов взаимодействия проходящих ударных волн с клином. Эксперименты проводились в ударной трубе [4]. В этих же условиях для измерения давления использовался и пьезокерамический преобразователь давления [5].

На рис. 1 показана схема размещения преобразователей в клине. К давлению чувствительны две пьезопластины из сульфата лития Y-среза размером $3 \times 0,5 \times 3,2$ мм вдоль осей x , y и z соответственно. Оси x каждой пластины параллельны, оси y и z антипараллельны. При таком расположении происходит компенсация электрических зарядов от сдвиговых напряжений в плоскости xz [3] и уменьшение искажений измеряемого импульсного давления, воздействующего вдоль оси y . Механические напряжения в клине вдоль осей x и z также вносят незначи-

тельные искажения в измерениях в связи с малостью поперечных пьезомодулей сульфата лития:

$$|d_{21}/d_{22}| \approx 0,01, |d_{23}/d_{22}| \approx 0,1.$$

Практически для всех других применяемых пьезоэлектриков (кварц, пьезокерамика и др.) эти отношения значительно больше, что приводит к существенным погрешностям при измерениях давления.

Снижение чувствительности преобразователя давления к ударному ускорению достигается выбором малых толщин пьезопластин (0,5 мм), электродов (никель, толщина 0,03 мм) и защитного слоя из эпоксидной смолы (0,1 мм). Существенна также низкая плотность сульфата лития (2052 кг/м³) по сравнению с плотностью пьезокерамики, кварца и других пьезоматериалов.

Чувствительность к давлению по напряжению в режиме холостого хода у сульфата лития значительно превосходит чувствительность других пьезоэлектриков [3]. Такой режим реализуется при максимальном приближении преусилителя с высокоомным входом к пьезоэластинам.

Сборка преобразователя непосредственно в теле модели позволяет исключить монтажные зазоры и получить высокую степень чистоты поверхности, что практически приводит к отсутствию искажений фронта ударной волны при прохождении ее вдоль поверхности преобразователя. При такой заделке преобразователя не возникают и локальные возмущения в спутном сверхзвуковом потоке, набегающем на модель.

Пьезокерамический преобразователь (см. рис. 1) имеет сравнительно небольшие размеры (диаметр корпуса 10, высота 10 мм) и достаточную чувствительность по давлению. В качестве чувствительного элемента используется керамика из цирконата-титаната свинца. Давление воспринимается металлической и фторопластовыми мембранами и через пластинку-электрод передается пьезоэлектрическому диску диаметром 5 мм. Металлическая мембрана припаяна к корпусу преобразователя и имеет волнистый профиль. Неровности приемной поверхности порядка 0,5—1,5 мм вносят заметные возмущения в наблюдаемую картину течения (рис. 2, а).

Для согласования высокоомного источника сигналов (каким является преобразователь) с остальной аппаратурой применялся эмиттерный повторитель с полевым транзистором [6]. Он обладает входным сопротивлением порядка 10^{10} Ом, коэффициентом передачи, практически равным единице, и низким уровнем собственных шумов. Для уменьшения амплитуды измеряемого сигнала использовалась масштабная емкость, включаемая параллельно преобразователю.

Перед каждым пуском установки проводилась проверка всего измерительного тракта и установление соответствия между линейным отклонением луча осциллографа и сигналом напряжения, вызывающим это отклонение. Для этого сигнал с генератора Г5-53 нужной полярности и амплитуды подавался через повторитель на соответствующий

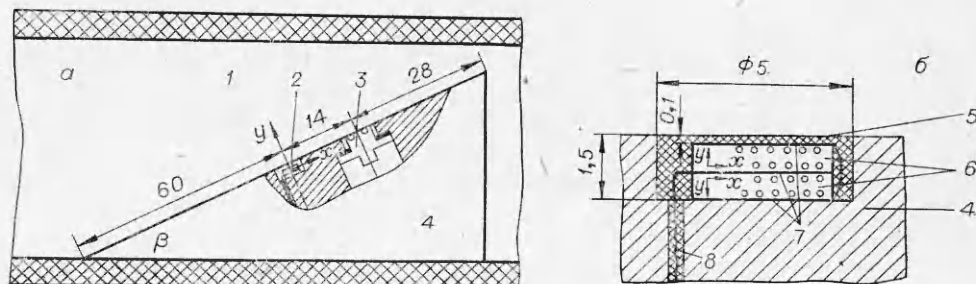


Рис. 1. Схема расположения преобразователей в клине (а) и конструкция сульфат-литиевого преобразователя (б).

1 — канал ударной трубы; 2, 3 — сульфат-литиевый и пьезокерамический преобразователи; 4 — клин; 5 — эпоксидная смола; 6 — пьезопластины из сульфата лития; 7 — электроды из никеля; 8 — проводник.

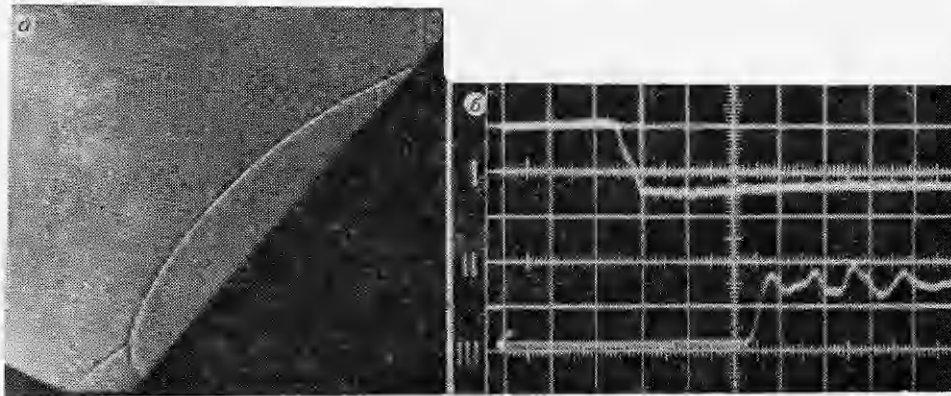


Рис. 2. Регулярное отражение ударной волны от клина.
 а) теньевая фотография ($\beta=48,3^\circ$, $p_0=5,3$ кПа, $u=843$ м/с); б) осциллограммы изменения давления в фиксированных точках на поверхности клина: I — луч сульфат-литиевого преобразователя, III — луч пьезокерамического преобразователя; масштаб времени — 5 мкс/дел.

луч осциллографа С1-33. Динамическая градуировка проводилась одновременно с измерением давления. Для этого амплитуде сигнала на фронте ударной волны приписывалось значение давления, рассчитанное по измеренной скорости фронта ударной волны. Коэффициент сульфат-литиевого преобразования при собственной емкости 32 пФ равен 7,9 мкВ/Па, а для пьезокерамического при емкости 220 пФ — 22,7 мкВ/Па.

На рис. 2, а — 4, а показаны теньевые фотографии волновых картин в углекислом газе, полученные при исследовании трех различных газодинамических процессов: квазистационарного взаимодействия ударной волны с клином (рис. 2, а), нестационарного взаимодействия двух следующих друг за другом ударных волн с простым клином (рис. 3, а) и одинарной ударной волны с двугранным клином (рис. 4, а). В рассматриваемых случаях при взаимодействии ударных волн с наклонной поверхностью возникают различные типы отражения. Наиболее простая волновая структура имеет место при регулярном отражении плоской ударной волны от клина.

Взаимодействие двух следующих друг за другом ударных волн с клином в отличие от предыдущего есть процесс сугубо нестационарный. Теоретическое решение задачи в настоящее время отсутствует. Интерес представляет получение из эксперимента данных о геометрии ударно-волновых взаимодействий и распределении параметров по поверхности клина в различные моменты времени.

На рис. 3, а показан один из возможных случаев подобного вза-



Рис. 3. Регулярное отражение двух ударных волн от клина.

а) теньевая фотография ($\beta=48,3^\circ$, $p_0=66,7$ кПа, $u=499$ м/с, $u^*=671$ м/с); б) осциллограмма изменения давления на клине (сульфат-литиевый преобразователь), масштаб времени — 50 мкс/дел; в) осциллограмма изменения давления на снимке ударной трубы (пьезокерамический преобразователь) масштаб времени — 100 мкс/дел, $\Delta p_{10}=185,4$ кПа, $\Delta p_{21}=92,2$ кПа.

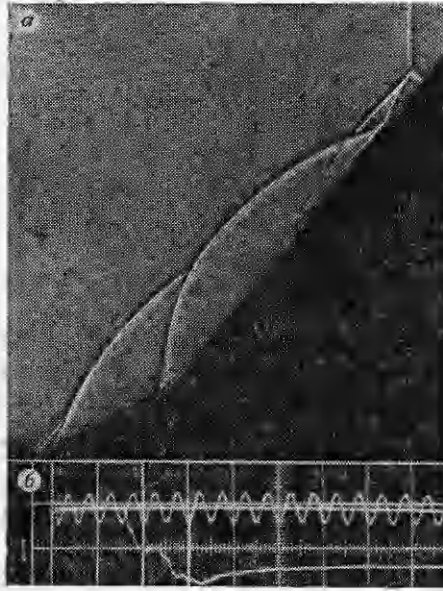


Рис. 4. Нерегулярное отражение ударной волны от второй грани двугранного клина.

а) теневая фотография ($\beta_1=25^\circ$, $\beta_2=48,3^\circ$, $p_0=5,3$ кПа, $u=843$ м/с); б) осциллограмма изменения давления во времени в фиксированной точке второй грани клина, масштаб времени — 10 мкс/дел.

которого образуются две преломленные ударные волны и контактный разрыв между ними; в точке D — регулярное отражение второй (преломленной) ударной волны от клина с образованием вторичного головного скачка; преломление вторичного головного скачка на контактном разрыве, выходящем из точки O . Дальнейшие изменения в волновой картине течения связаны с догонным взаимодействием двух головных скачков (первичного и вторичного), что детально описано в [7].

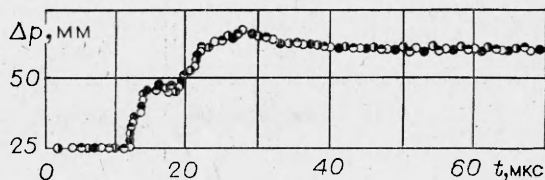
Последний из рассматриваемых случаев — взаимодействие ударной волны с двугранным клином — является также нестационарным. Вначале происходит квазистационарное взаимодействие ударной волны с первым клином, затем наступает перестроечная (чисто нестационарная) стадия, в результате которой формируется определенный тип взаимодействия ударной волны со второй гранью двугранного клина. Подробные сведения о динамике этого сложного процесса можно найти в [8].

В условиях эксперимента, приведенного на рис. 4, а, отражение ударной волны от второй грани клина нерегулярное. Данная волновая картина течения существенным образом отличается от картины течения при регулярном отражении на рис. 2, а. В случае нерегулярного отражения ударной волны точка пересечения падающей и отраженной ударных волн находится на некотором расстоянии от поверхности клина, наблюдается излом на отраженной ударной волне и дополнительный внутренний скачок, исходящий из точки излома.

Характер изменения давления во времени в фиксированной точке поверхности клина при регулярном отражении ударной волны, регулярном отражении двух волн и нерегулярном отражении одной волны показан соответственно на рис. 2, б—4, б. В первом случае (см. рис. 2, б, луч 1) давление резко возрастает в момент прохода ударной волны мимо преобразователя, далее в течение 5—7 мкс остается постоянным и затем несколько падает. Во втором случае (см. рис. 3, б) клин испытывает двухступенчатый подъем давления, причем второй подъем связан с прохождением мимо преобразователя второй (преломленной) ударной волны. После первого подъема давление несколько падает, после второго в течение времени наблюдения остается постоянным.

Наиболее сложный динамический характер нагружения наклонной плоскости зарегистрирован при нерегулярном отражении ударной волны от второй грани двугранного клина (см. рис. 4, б). После прохода ударной волны клин испытывает двухступенчатый подъем давления, за-

Рис. 5. Наложение четырех сигналов давления от сульфат-литиевого преобразователя, полученных в разных экспериментах при начальных условиях рис. 4, а.



тем более плавное увеличение до максимального значения и далее падение к давлению обтекания.

Результаты измерения давления, полученные при исследовании трех газодинамических процессов, показали, что встроенный сульфат-литиевый преобразователь давления обладает рядом существенных преимуществ по сравнению со съемным пьезокерамическим. Благодаря высокому временному разрешению сульфат-литиевого преобразователя хорошо регистрируется сложный ход кривой давления при нерегулярном отражении ударной волны от второй грани двугранного клина (см. рис. 4, б), который находится в полном согласии с описываемой газодинамической картиной течения.

Стабильность воспроизведения сигналов давления, регистрируемых данным преобразователем показана на рис. 5. Здесь представлено наложение четырех кривых давления, полученных в разных экспериментах при одинаковых начальных условиях.

По динамическим свойствам сульфат-литиевый преобразователь намного превосходит пьезокерамический. В качестве примера на рис. 2, б приведены два сигнала изменения давления на поверхности клина во времени, полученные от разных преобразователей. Их анализ показал, что динамическая погрешность (отношение половины амплитуды шума к амплитуде сигнала) для сульфат-литиевого преобразователя составляет 3%, а для пьезокерамического — 22%. Период наблюдаемого шума равен соответственно 1,25 и 5 мкс.

В экспериментах исследована зависимость динамической погрешности от соотношения между временем прохождения ударной волны мимо приемной поверхности преобразователя (t) и периодом наблюдаемых шумов (T). В качестве примера на рис. 3, в приведена осциллограмма изменения давления на стенке ударной трубы при последовательном прохождении мимо пьезокерамического преобразователя двух ударных волн неравной интенсивности. Скачок давления на фронте второй ударной волны $\Delta p_{21} = p_2 - p_1$ в 2 раза меньше первой $\Delta p_{10} = p_1 - p_0$. Абсолютная скорость фронта второй волны u^* больше скорости первой u . В этих условиях наибольшая амплитуда шума наблюдается при меньшем скачке давлений, т. е. на второй волне. Динамическая погрешность при измерении давления на фронте первой ударной волны составляет 5, на фронте второй — 50%. Сильное возрастание амплитуды шума на второй ударной волне по сравнению с первой связано с уменьшением соотношения t/T . Наибольшая амплитуда шума должна наблюдаться в режиме, когда $t \approx T$.

В таблице приведены результаты измерения динамической погрешности a пьезокерамического и сульфат-литиевого преобразователей в зависимости от скорости фронта ударной волны при разных соотношениях t/T . Видно, что с уменьшением t/T наблюдается рост a для обоих преобразователей. Однако при всех условиях динамическая погрешность сульфат-литиевого преобразователя меньше.

Результаты измерения давления, полученные при исследовании трех газодинамических процессов, показали, что встроенный измерительный преобразователь из сульфата лития обладает достаточной чувствительностью, малой динамической погрешностью, высоким временным разрешением, высокой частотой собственных колебаний, стабильностью характеристик во времени, а также не вносит возмущений в исследуемое течение. Основные достоинства данного преобразователя обусловлены как принятой схемой конструкции, так и свойствами применяемого в нем

Тип преобразователя	Условия измерения	u, м/с	t/T	α , %
Пьезокерамический	Стенка	499	3,2	5
	»	843	1,9	19
	»	1640	1,0	40
	Клин, $\beta=15^\circ$	505	2,6	11
	То же	1493	1,1	35
	Клин, $\beta=48,3^\circ$	750	1,7	11
То же	1267	1,3	22	
Сульфат-литиевый	Клин, $\beta=48,3^\circ$	750	3,4	2
	То же	1267	2,0	5

чувствительного элемента — пьезоэлектрика сульфата лития моногидрата, для которого характерна высокая чувствительность и малая величина поперечных пьезомодулей по сравнению с продольным.

Авторы выражают благодарность М. П. Сыщиковой за предоставленные материалы исследования нестационарного взаимодействия ударной волны с двугранным клином и участие в обсуждении данной работы, а также Х. Н. Моллаеву за изготовление преобразователей давления из сульфата лития.

Поступила в редакцию 18/II 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Зайцев. ПТЭ, 1958, 6, 97.
2. Л. Г. Гвоздева, Ю. В. Жилин. ПТЭ, 1978, 5, 249.
3. И. В. Плотников. Тр. метеорологических институтов СССР. Вып. 139 (199). Л.: Энергия, 1972.
4. М. К. Березкина, А. Н. Семенов, М. П. Сыщикова. ПМТФ, 1964, 5, 154.
5. Н. А. Бойков, П. С. Звездин, Л. Б. Резнюк. Измерение давлений при быстропотекающих процессах. Вып. 390. М.: Энергия, 1970.
6. Я. Т. Загорский и др. Измерительные усилители на транзисторах. М.: Энергия, 1971.
7. М. К. Beryozkina, M. P. Syshchikova et al. Arch. Mech., 1980, 32, 5, 621.
8. М. Р. Syshchikova, I. V. Krassovskaya. Arch. Mech., 1979, 31, 1, 135.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*А. А. Дерibas, В. Ф. Несгеренко, Т. С. Тесленко
(Новосибирск)*

Механизм упрочнения металлов и сплавов, подвергнутых ударно-волновому нагружению, в настоящее время нельзя считать выясненным полностью. Среди параметров, определяющих эффект упрочнения, различные авторы называют величину давления во фронте ударной волны [1], величину деформации за фронтом [2], форму и длительность импульса сжатия [3, 4], время нарастания давления [5] и др. В работе [6] установлено определяющее влияние остаточной деформации образца на эффект упрочнения, которая «накладывается» на ударно-волновое воздействие и может существенно изменить механические свойства обрабатываемых образцов и даже вызвать разупрочнение. На упрочнение влияет также способ ударно-волнового нагружения, например подрыв контактного заряда или удар пластинкой, если образец находится в области нестационарного движения ударной волны.