

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Ф.И. Тарасов, Е.Б. Смирнов, А.Ю. Николаев, Р.Н. Канунников, Д.Т. Юсупов, В.В. Малёв, А.С. Лобачёв, К.С. Сидоров, Д.В. Мухин

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия, e-mail: vniitf@vniitf.ru

При ударно-волновом нагружении в материалах возникают различные физические, физико-химические и механические процессы: сильное сжатие твердых тел, экстремально высокие температуры разогрева, фазовые превращения, изменение электронной структуры, упрочнение твердых тел в ударных волнах, откольное разрушение и т.д. Понимание физической сущности таких процессов и их правильная интерпретация необходимы для построения корректных математических моделей и решения разнообразных прикладных задач.

Анализ ударной сжимаемости некоторых полимеров показывает, что эти вещества в условиях высокоинтенсивного нагружения претерпевают физико-химические превращения и приобретают свойства, отличающиеся от наблюдаемых при нормальных условиях.

Особый интерес представляет эпоксидная смола, принадлежащая классу эпоксидных полимеров. Обладая универсальными свойствами, она широко применяется в различных областях: от домашнего хозяйства до судо-, авиа- и ракетостроения. Эпоксидная смола также является конструкционным материалом и широко применяется в газодинамических экспериментах.

Однако, имеющаяся на сегодняшний день информация о поведении эпоксидной смолы при ударном сжатии [1-3] противоречива. В работе [1] представлены результаты исследования ударного сжатия отвержденной эпоксидной смолы марки ЭД-5 $\rho_0 = 1,178 \pm 1,20 \text{ г/см}^3$ в диапазоне давлений от 4 до 53 ГПа и приведены расчетные оценки температуры вещества при ударном сжатии. В интервале давлений 18-20 ÷ 35 ГПа обнаружен участок ударной адиабаты с повышенной сжимаемостью и установлен спад температуры с 1400 до 1100 К, который авторы связывают с фазовым превращением эпоксидной смолы.

В работе [2] приведены результаты экспериментов по измерению температуры в прозрачных образцах ударно-сжатого эпоксидного состава ЕС141 NF $\rho_0 = 1,13 \text{ г/см}^3$ в диапазоне давлений 19-42 ГПа. В эпоксидном компаунде ЕС141 NF в диапазоне давлений от 19 до 35 ГПа область фазового перехода явно не выражена.

Также изучение свойств эпоксидной смолы проводилось в [3], где пирометрическим методом измерена яркостная температура ударно-сжатой эпоксидной смолы ЭД-5 $\rho_0 = 1,19 \text{ г/см}^3$ в диапазоне давлений 30-70 ГПа. При давлении 45-50 ГПа обнаружен спад температуры с 4000 К до 2800 К, который авторы связывают с фазовым превращением вследствие эндотермической реакции разложения. При давлении 35 ГПа каких-либо особенностей не выявлено, что также не согласуется с результатами [1].

Таким образом, имеющаяся совокупность данных неоднозначно описывает поведение эпоксидной смолы при ударном нагружении в исследуемом диапазоне и обуславливает необходимость исследований для уточнения поведения изучаемого вещества.

Фазовое превращение характеризуется разрывами первой и второй производных давления по объему. Разрыв первой производной отражается в виде излома на ударной адиабате, а разрыв второй производной – изломом на зависимости скорости звука от давления. На форме ударных адиабат фазовые переходы слабо отражаются из-за малых скачков удельных объемов при превращениях. Зависимость скорости звука от давления $C(P)$ является более чувствительным индикатором наклона адиабаты, поэтому по скачкообразному изменению зависимости скорости звука можно судить об изменении фазового состояния материала вдоль его ударной адиабаты.

На рисунке 1 в D - u -координатах показана совокупность данных по ударной сжимаемости эпоксидной смолы, полученная разными авторами [1, 2, 4, 5]. Стоит отметить, что данные, за исключением [5] согласуются.

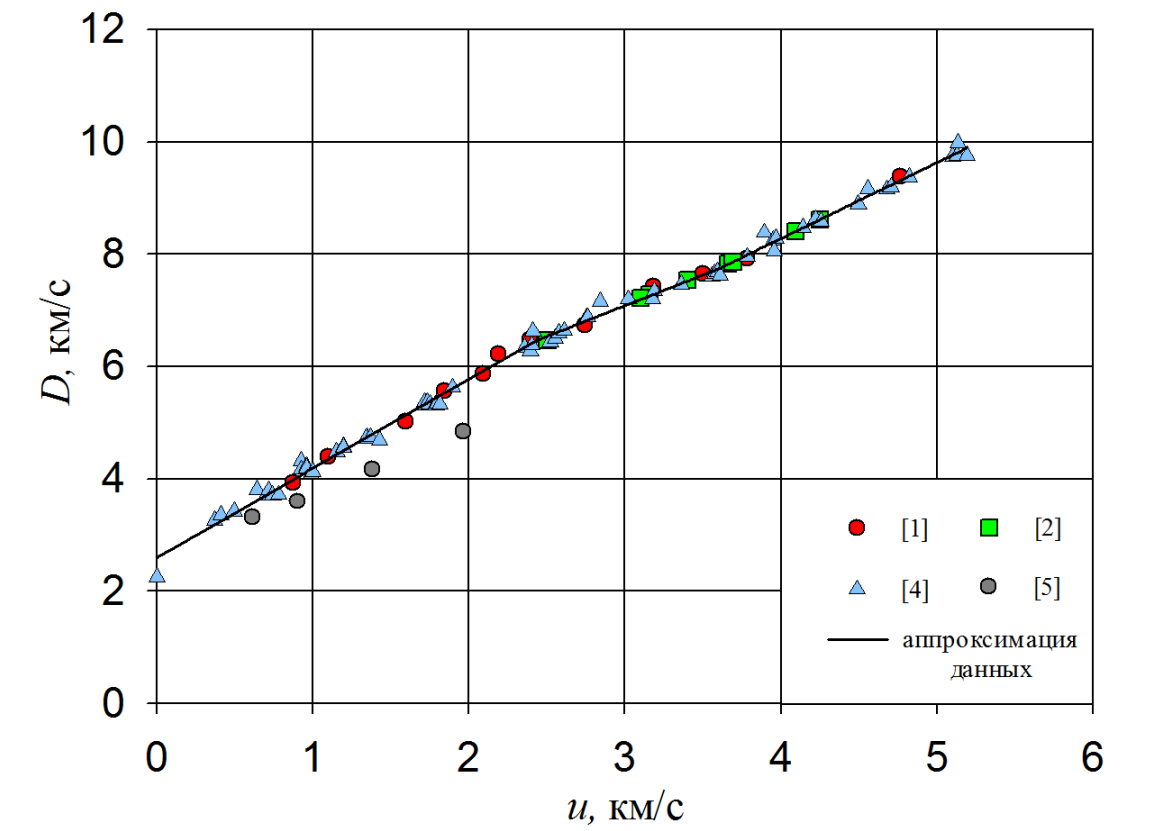


Рисунок 1 – Ударная адиабата эпоксидной смолы в D - u -координатах

Совокупность данных [1, 2, 4] была аппроксимирована линейной функцией. По результатам аппроксимации определено три участка ударной адиабаты эпоксидной смолы, для каждого из которых подобраны коэффициенты D - u -соотношения:

$$\begin{aligned} D_1 &= 2,65+1,562 \cdot u_1, \quad (0 \leq u_1 \leq 2,490 \text{ км/с}); \\ D_2 &= 3,84+1,086 \cdot u_2, \quad (2,490 \leq u_2 \leq 3,609 \text{ км/с}); \\ D_3 &= 2,87+1,355 \cdot u_3, \quad (3,609 \leq u_3 \leq 5,189 \text{ км/с}). \end{aligned} \quad (1)$$

Как видно из рисунка 1, при $u = 2,42 \text{ км/с}$ и $u = 3,61 \text{ км/с}$ ($P = 18 \text{ ГПа}$ и $P = 33 \text{ ГПа}$, соответственно) видны плавные изломы ударной адиабаты, которые могут свидетельствовать о фазовом превращении эпоксидной смолы. Для уточнения данного вопроса требуется проведение взрывных экспериментов по определению скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле.

Для определения скорости звука в ударно-сжатых материалах используются методы боковой, догоняющей и встречной разгрузок, которые основаны на регистрации фронта ударной волны (ФУВ) в веществе и параметров за фронтом при ударно-волновом нагружении.

В качестве методов регистрации применяются фотохронографический, электроконтактный, манганиновый, фотоэлектрический, электромагнитный, лазерно-интерферометрический методы и др. В настоящее время наиболее используемыми методами регистрации параметров ударно-сжатого вещества для определения скорости звука являются манганиновый, фотоэлектрический и лазерно-интерферометрический.

В данной работе определение скорости звука осуществлялось фотоэлектрическим методом (ФЭМ). Суть ФЭМ заключается в регистрации изменения яркости теплового излучения индикатора, вызванного сжатием вещества ударной волной (УВ) и последующей разгрузкой. Структурная схема постановки эксперимента с применением ФЭМ представлена на рисунке 2.

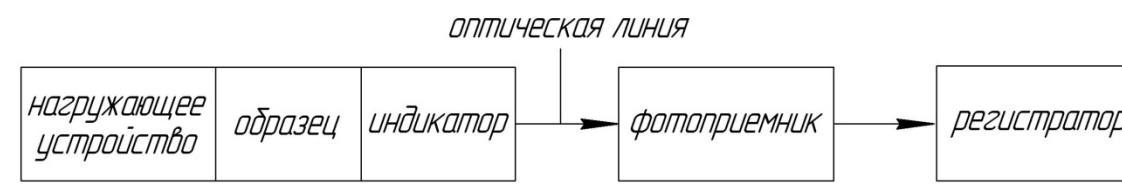


Рисунок 2 – Схема постановки эксперимента

На рисунке 3 представлена x - t -диаграмма волновых процессов для определения скорости звука в ударно-сжатом веществе фотоэлектрическим методом. Тонкие линии на диаграмме соответствуют волновым процессам в ударнике, толстые – в образце, пунктирные – в индикаторе.

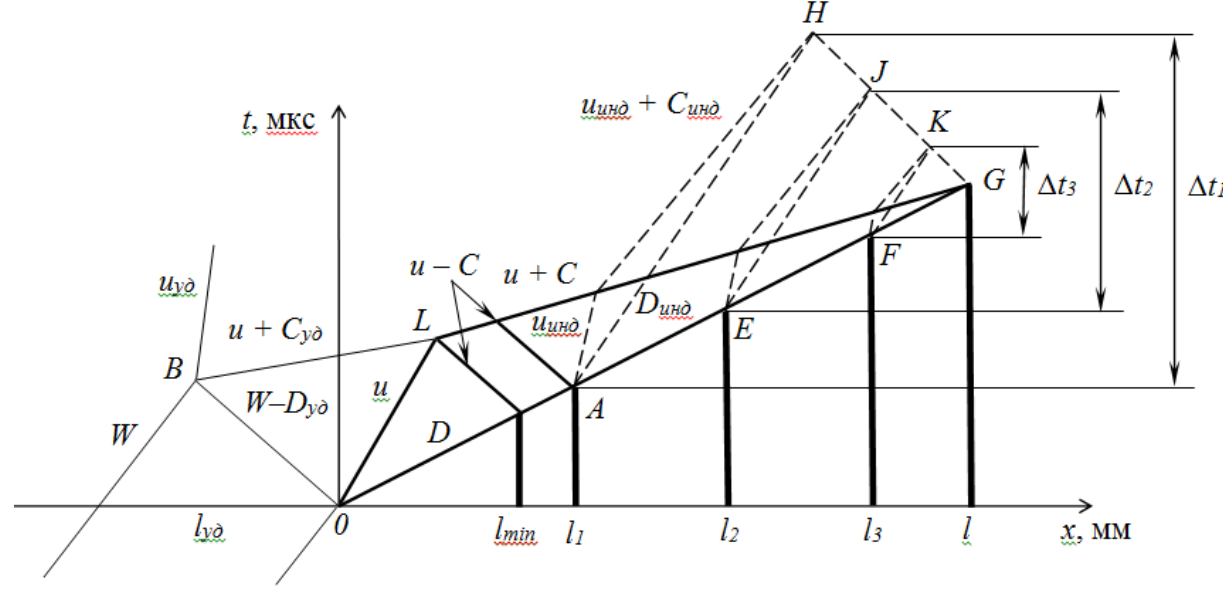


Рисунок 3 – x - t -диаграмма волновых процессов

После соударения пластины с образцом в обе стороны распространяются ударные волны OB и OG . При выходе УВ на тыльную сторону ударника (точка B на рис. 3) образуется впер волн разгрузки (ВР). УВ в образце, распространяясь со скоростью D , выходит на контактные границы образец-индикатор (точки A, E, F на рис. 3) и индикатор начинает излучать тепловую энергию. Яркость излучения индикатора за фронтом ударной волны близка к постоянной. Через некоторое время ВР догоняет ФУВ, давление за фронтом и, следовательно, яркость излучения индикатора начинает падать (точки H, J, K на рис. 3). Из x - t -диаграммы волновых процессов скорость звука в ударно-сжатом образце можно выразить в следующем виде:

$$C = \frac{C_{y0} \cdot D_{y0} \cdot R - u \cdot (C_{y0} + u + D_{y0} - W)}{C_{y0} \cdot \frac{D_{y0}}{D} \cdot R - (C_{y0} + u + D_{y0} - W)} \cdot u \quad (2)$$

где W – скорость полета ударника к образцу, [км/с]; D_{y0} – скорость УВ в ударнике, [км/с]; C_{y0} – скорость звука в ударнике, [км/с]; u – массовая скорость вещества образца за ФУВ, [км/с]; D_{ep} – скорость УВ в образце, [км/с]; R – отношение толщины образца l , при которой происходит догон ФУВ первой характеристикой ВР, к толщине ударника l_{up} .

Определение толщины образца l , на которой ВР, образованная на тыльной стороне ударника, догоняет ФУВ, осуществляется с помощью индикатора. Проводя измерения при различных толщинах образца и экстраполируя зависимость интервала времени от момента вхождения УВ в индикатор до момента догона ФУВ волной разрежения в индикаторе от толщины ступени $dt = f(l)$ к $dt = 0$, можно определить толщину l , при которой первая характеристика ВР, образованная на тыльной стороне ударника, догоняет ФУВ как раз на поверхности образца. Если изготовить ступенчатый образец и покрыть его слоем прозрачного индикатора, то зависимость $dt = f(l)$ и, следовательно, искомую толщину образца l можно определить в одном эксперименте. Толщины ступеней определяются из x - t -диаграммы таким образом, чтобы догон ФУВ волнами разрежения осуществлялся в индикаторе. Эскиз экспериментального узла представлен на рисунке 4.

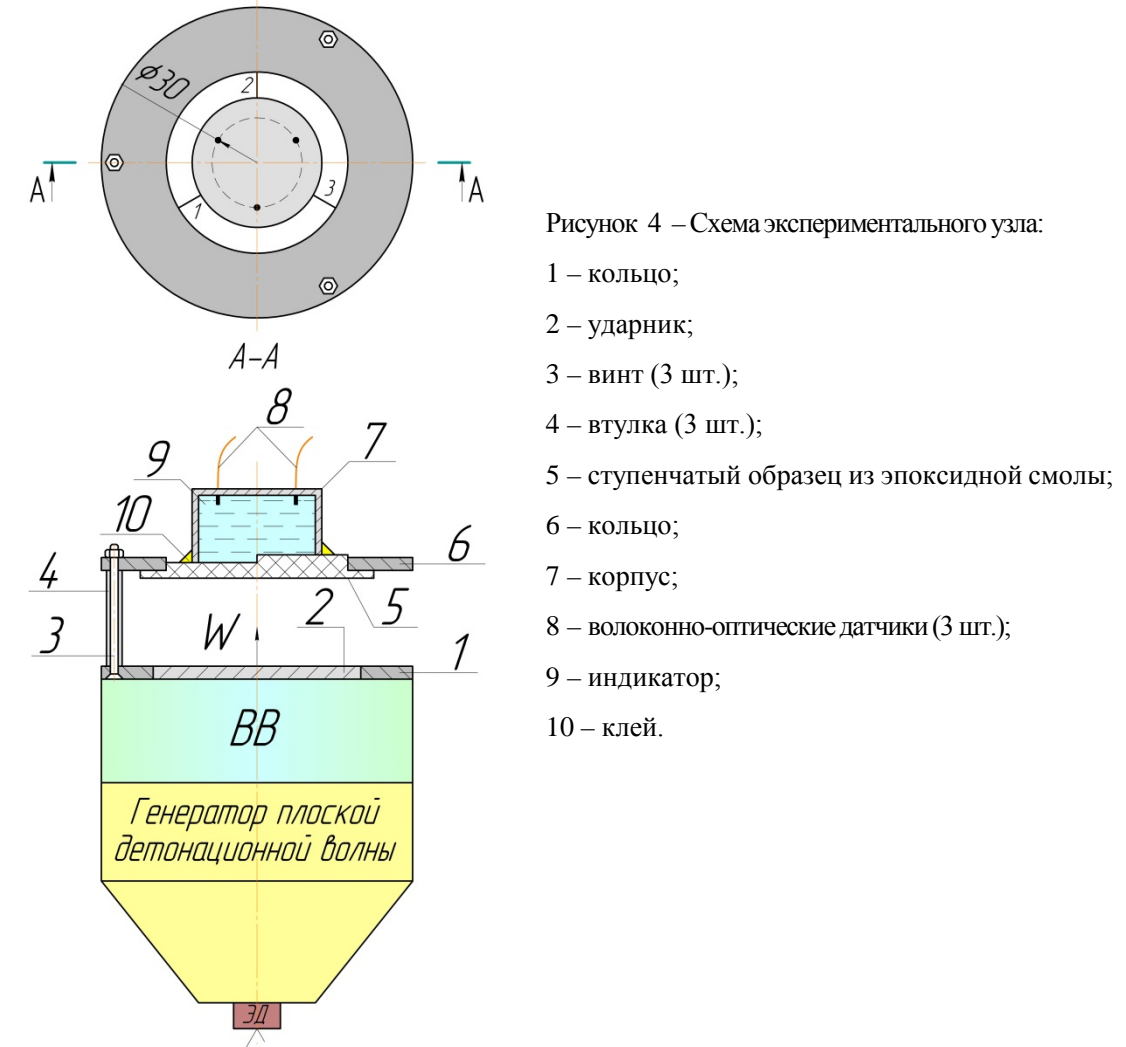


Рисунок 4 – Схема экспериментального узла:
1 – кольцо;
2 – ударник;
3 – винт (3 шт.);
4 – втулка (3 шт.);
5 – ступенчатый образец из эпоксидной смолы;
6 – кольцо;
7 – корпус;
8 – волоконно-оптические датчики (3 шт.);
9 – индикатор;
10 – клей.

Для создания УВ в образцах применялись нагружающие устройства металлического типа на основе мощных конденсированных взрывчатых веществ. Такие устройства состоят из генератора плоской детонационной волны, заряда ВВ и пластины-ударника. Ударники изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т или стали 10. Диапазон скоростей полета ударников составлял от 2,7 до 4,8 км/с. По данным предварительной отработки нагружающих устройств равномерность полета ударников к образцу в круге диаметром 50 мм не превышает 40 нс.

Учитывая оптическую прозрачность исследуемого материала в ИК-спектре на каждую ступень образца приклеивалась алюминиевая фольга толщиной 0,01 мм для экранирования датчиков от преждевременной засветки излучением, вызванным сжатием образца ударной волной.

В качестве индикатора использовался хлороформ. Индикатор заливался в корпус непосредственно перед проведением взрывного эксперимента.

Сигналы с волоконно-оптических датчиков (поз. 8 на рис. 4) подавались через оптоэлектронные преобразователи на осциллографы. Спектральная чувствительность преобразователей составляла от 480 до 960 нм и от 900 до 1700 нм. Для повышения надежности измерений осуществлялось их дублирование путем деления сигнала с датчиков. Делители устанавливались на входе оптоэлектронных преобразователей.

Типичные сигналы, полученные в экспериментах, представлены на рисунке 5.

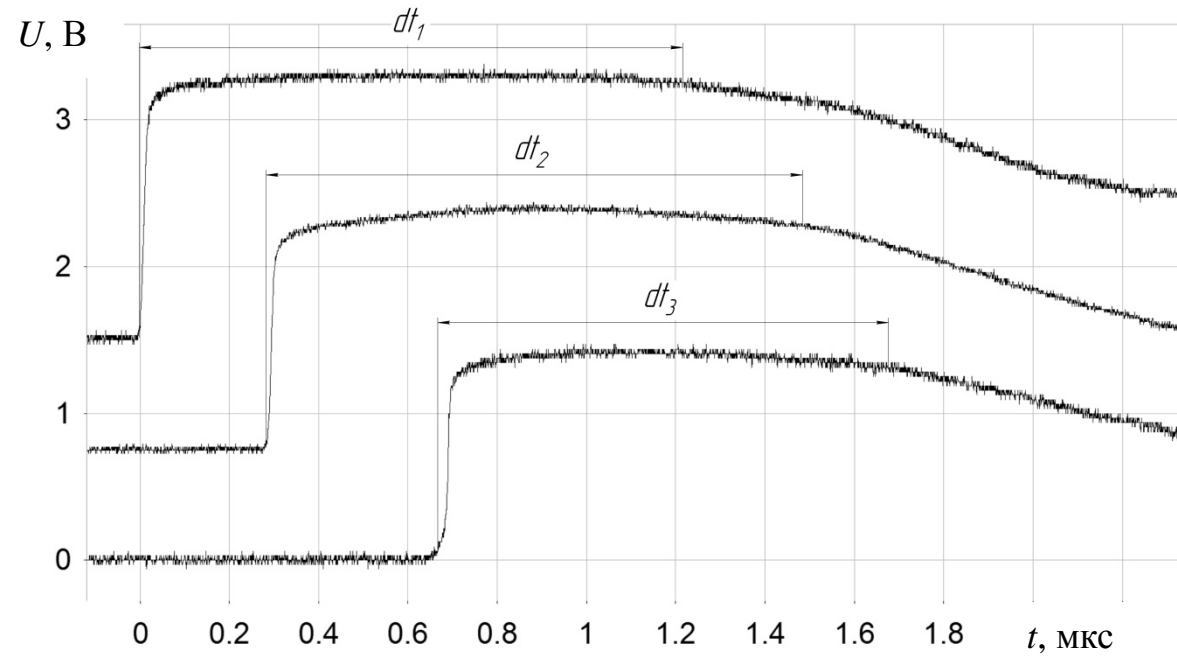


Рисунок 5 – Типичные сигналы с датчиков

Из полученных профилей $U(t)$ определялись временные интервалы dt_i от момента вхождения УВ в индикатор до момента догона ФУВ волной разрежения в индикаторе. Далее, путем экстраполяции зависимости $dt_i = f(l)$ к $dt = 0$, определялась толщина l образца, на которой ВР догоняет ФУВ на поверхности образца, и по формуле (2) рассчитывалась скорость звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле. Данные постановки и результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные постановки и результаты экспериментов

№ опыта	1	2	3	4	5	6
Материал ударника	12X18H10T					Сталь 10
$\rho_{y0}, \text{ г/см}^3$	7,89	7,91	7,87	7,93	7,92	7,84
$h_{y0}, \text{ мм}$	4,00	4,00	3,98	4,02	4,02	3,03
$W, \text{ км/с}$	2,65	3,64	3,84	4,01	4,01	4,80
$\rho_0, \text{ г/см}^3$	1,18					
$h_{t1}, \text{ мм}$	8,84	7,87	7,90	8,90	8,84	5,89
$h_{t2}, \text{ мм}$	11,86	9,89	9,90	11,94	11,88	7,87
$h_{t3}, \text{ мм}$	14,86	11,86	11,85	14,94	14,81	9,94
$u, \text{ км/с}$	2,248	3,045	3,203	3,342	3,341	3,893
$D, \text{ км/с}$	6,161	7,143	7,314	7,466	7,465	8,140
$\rho, \text{ г/см}^3$	1,86	2,06	2,10	2,13	2,13	2,26
$P, \text{ ГПа}$	16,35	25,66	27,65	29,44	29,43	37,40
$dt_1, \text{ мкс}$	1,600	1,590	1,419	1,022	0,993	-
$dt_2, \text{ мкс}$	0,893	1,255	1,073	0,818	0,744	0,626
$dt_3, \text{ мкс}$	0,582	1,014	0,794	0,435	0,464	0,392
$C, \text{ км/с}$	7,28	7,85	8,90	7,72	7,59	9,48

Также были проведены взрывные эксперименты по определению скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле с использованием метода манганинового датчика. Определение скорости звука осуществлялось методами догоняющей и встречной разгрузок. Для ударно-волнового нагружения использовались устройства, аналогичные первой серии экспериментов. Схема постановки экспериментов представлена на рисунке 6.

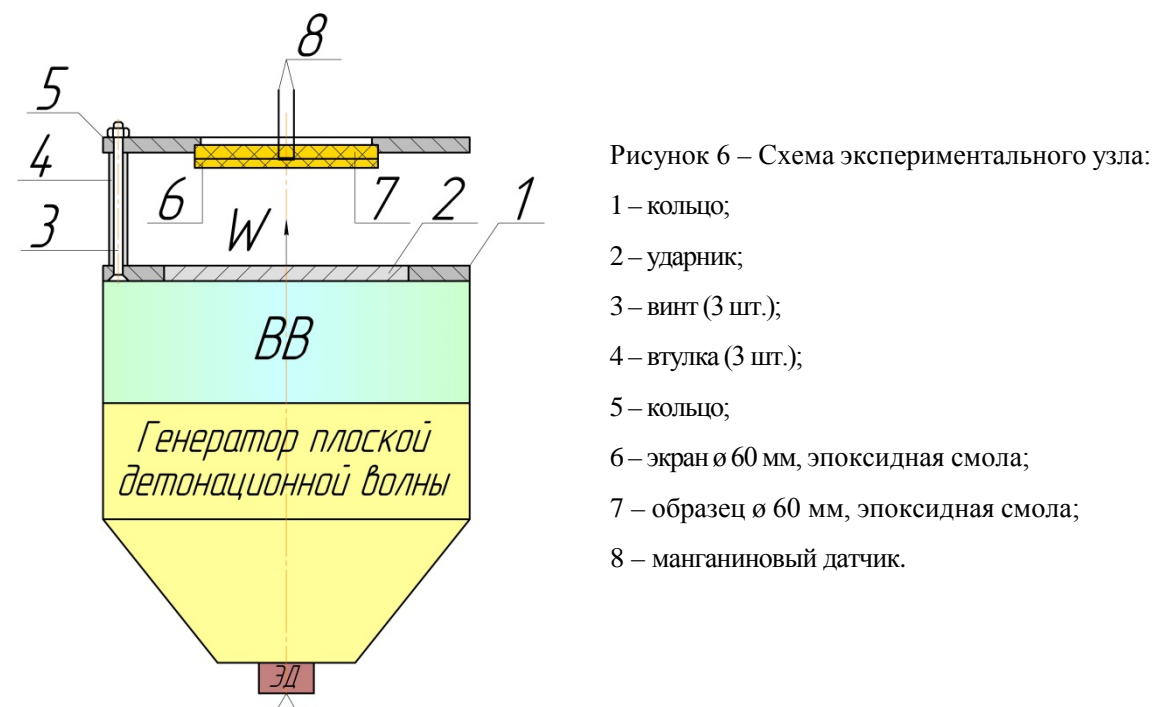


Рисунок 6 – Схема экспериментального узла:
1 – кольцо;
2 – ударник;
3 – винт (3 шт.);
4 – втулка (3 шт.);
5 – кольцо;
6 – экран ϕ 60 мм, эпоксидная смола;
7 – образец ϕ 60 мм, эпоксидная смола;
8 – манганиновый датчик.

Манганиновый датчик (поз. 8 на рис. 6) располагался между экраном и образцом (поз. 6 и 7 на рис. 6, соответственно), при этом чувствительный элемент датчика устанавливался по центру образца. Зазор между экраном и образцом в образце с выводами датчика заполнялся составом на основе эпоксидного клея.

Данные постановки и результаты экспериментов приведены в таблице 2. Погрешность определения скорости звука фотоэлектрическим методом составляет 6%, манганиновым – 8%.

Таблица 2 – Данные постановки и результаты экспериментов

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$W, \text{ км/с}$	2,35	2,91	2,90	3,58	3,60	3,62	3,85	3,87
$\rho_0, \text{ г/см}^3$	1,19	1,19	1,19	1,19	1,18	1,19	1,19	1,18
$u, \text{ км/с}$	2,003	2,457	2,448	2,995	3,01	3,028	3,21	3,228
$D, \text{ км/с}$	5,779	6,488	6,474	7,089	7,105	7,125	7,326	7,341
$\rho, \text{ г/см}^3$	1,81	1,91	1,90	2,05	2,05	2,06	2,11	2,12
$P, \text{ ГПа}$	13,66	18,81	18,70	25,07	25,32	25,55	27,74	28,13
$C, \text{ км/с}$	6,50*	7,89*	7,13**	7,06*	7,62*	8,26**	7,27*	8,48**

* – скорость звука определялась по методу догоняющей разгрузки;
** – скорость звука определялась по методу встречной разгрузки.

На рисунке 7 представлена зависимость $C(P)$ скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле от давления за фронтом ударной волны. Зависимость аппроксимирована линейной функцией.

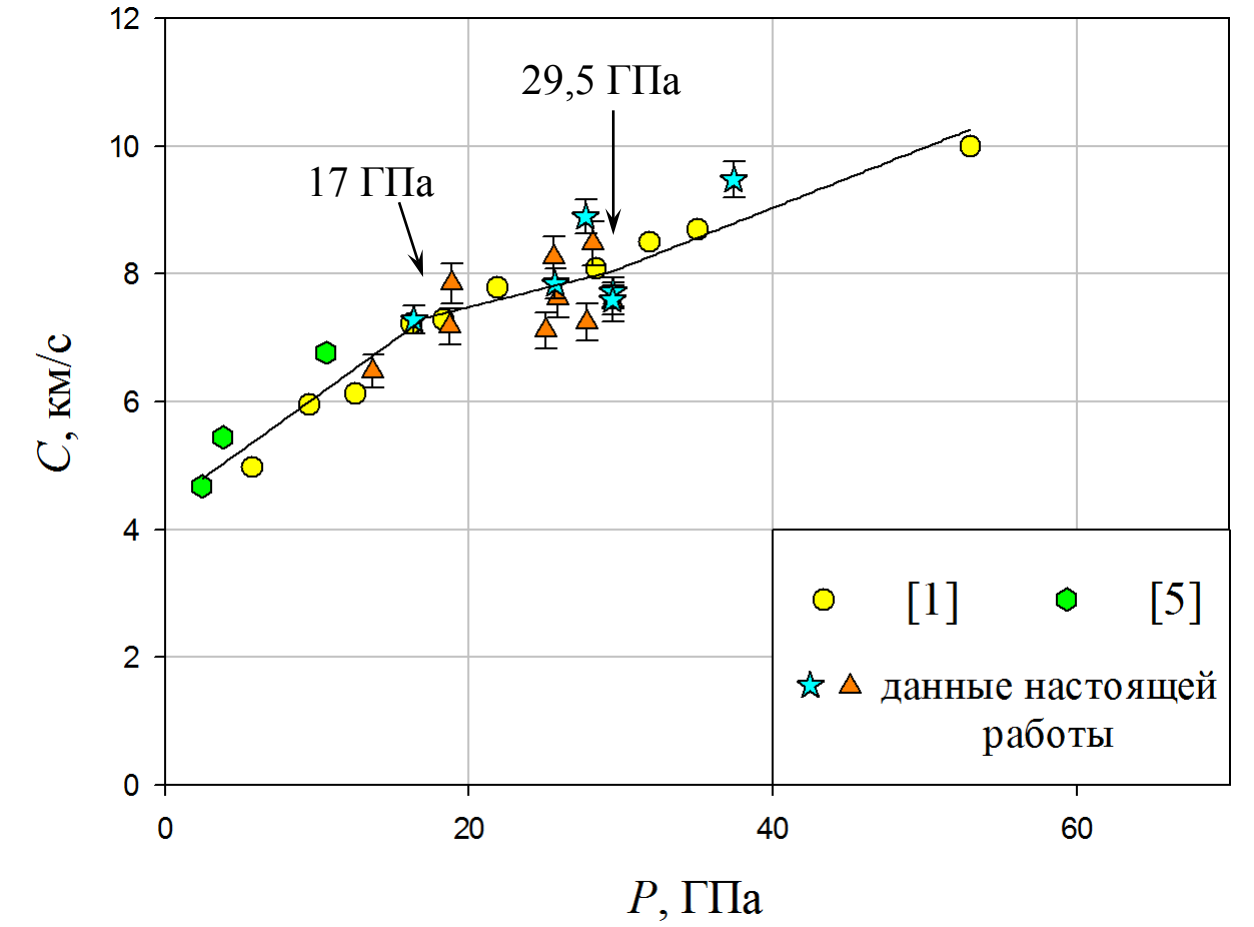


Рисунок 7 – Зависимость $C(P)$ в ударно-сжатой эпоксидной смоле

Из рисунка 7 видно, что при давлениях 17 ГПа и 29,5 ГПа линия аппроксимации претерпевает изломы, что может свидетельствовать о фазовом превращении эпоксидной смолы при указанных давлениях.

Давление $P = 17 \text{ ГПа}$, характеризующее первый излом C - P -зависимости, в целом, согласуется с результатами аппроксимации данных по ударной сжимаемости эпоксидной смолы [1, 2, 4], где были определены две точки перегиба D - u -соотношения, соответствующие давлениям 18 ГПа и 33 ГПа.

В диапазоне давлений 25 ÷ 30 ГПа наблюдается значительный разброс данных по скорости звука. Такое поведение вещества характерно при наличии фазового перехода и может быть обусловлено разрывами химических связей и образованием новых, о чем говорилось в [1].

Результаты, полученные методом манганинового датчика, удовлетворительно согласуются с данными, полученными фотоэлектрическим методом, и данными [1].

В настоящей работе представлены результаты определения скорости звука в ударно-сжатых образцах из эпоксидного компаунда ЭК-34 с начальной плотностью образцов $\rho_0 = 1,18 \text{ г/см}^3$ в диапазоне давлений от 16 до 38 ГПа фотоэлектрическим методом и методом манганинового датчика. Полученные экспериментальные данные согласуются с данными [1, 5] по скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле. По результатам аппроксимации C - P зависимости при давлениях 17 и 29,5 ГПа обнаружены изломы, которые можно связать с фазовым превращением эпоксидной смолы. Для уточнения верхней границы фазового превращения необходимы данные по скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле при давлениях выше 30 ГПа, что обуславливает дальнейшее исследование поведения вещества, в том числе, с применением других методов регистрации параметров ударного сжатия за фронтом ударных волн.

Список использованных источников

1. К.К. Krupnikov, V.P. Krupnikova. Equation of state and matter transformation parameters under shock compression for epoxy resin // Shock Waves. Eds.: R. Brun, L.Z. Dimित्रescu. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995.
2. С.А. Бордюловский, С.М. Караханов, К.В. Хищенко. Измерение яркостной температуры эпоксидной смолы при ударном сжатии // ФТБ, т. 49, №1, 2013, с. 138 – 142.
3. М.В. Жерноклетов, С.И. Киришанов, А.Е. Ковалёв, А.Б. Жежов, М.Г. Новиков. Экспериментальное определение температур ударного сжатия эпоксидного состава ЭД-5 // VIII Харитоновские Научные Читания, 2009, с. 141.
4. L.A.S.L. Schock Hugoniot Data. Berkly, Los Angeles, London: University of California Press, 1980.
5. В.М. Мочалова, А.В. Уткин, А.В. Павленко, С.Н. Малогина, С.С. Мокрушин. Импульсное сжатие и растяжение эпоксидной смолы при ударно-волновом воздействии // Журнал технической физики, т. 89, № 1, 2019, с. 126 – 131.