

Изучение возможности замены углеродистых датчиков давления Allen Bradley коммерческими резисторами

77-30569/303217

01, январь 2012

Андреев С. Г.

УДК.662.215; 623.488

МГТУ им. Н.Э. Баумана
andreeff2007@mail.ru

Введение

Экспериментальные исследования поведения зарядов взрывчатых веществ (ВВ) при низкоскоростных механических, пробивных (проникающих) и ударно-волновых воздействиях применительно к задачам разработки взрывных устройств пониженной уязвимости или задач нейтрализации (перевода во взрывобезопасное состояние) этих устройств вызвали необходимость использования датчиков динамики давления улучшенных функциональных возможностей. Такие датчики должны обеспечивать не только необходимую временную разрешающую способность измерительной системы, но и возможность измерения давления как в дивергентных, так и высокотурбулентных потоках, в которых применение манганиновых датчиков из-за проявления тензоэффекта становится недопустимым. В дополнение к этому у датчиков должно быть большое «время жизни» в таких условиях регистрации давлений (до десятков–сотен микросекунд и, даже, миллисекунд против единиц микросекунд у манганиновых датчиков). Достаточно часто, особенно при проведении экспериментов в полигонных условиях с плохо предсказуемой ответной реакцией зарядов ВВ на внешнее воздействие, датчики должны обладать дополнительным свойством: быть дешевыми и допускать возможность их одноразового применения, сопровождаемого их разрушением. Исходя из этих соображений, иногда используют датчики с пьезоэлементами из керамики ЦТС–19, а также из углеродистых резисторов. Датчики с пьезоэлементами из ЦТС–19 достаточно подробно рассмотрены в [1, 2]. Этим датчикам свойственен такой недостаток, как зависимость чувствительности от скорости нарастания давления во фронте регистрируемого импульса и «высокоомность», приводящая к слабой помехозащищенности измерительных систем, высокая чувствительность к помехообразующим «сейсмическим» и им подобным воздействиям.

Приблизительно в 90-ые годы прошлого столетия при исследованиях стойкости изделий, снаряженных различными ВВ, в том числе и вновь разрабатываемыми низкочувствительными составами, стали широко применять углеродистые датчики давления [3-7]. Достаточно удобными для проведения экспериментов являются датчики, описание которых приведено в [8]. Эти датчики получены на основе прототипов — коммерческих углеродистых резисторов объемного типа, производимых корпорацией Allen Bradley, с номинальной мощностью 0,125 Вт, которые представляют собой керамическую трубочку диаметром 1,7 мм и длиной 4,2 мм, с внутренней полостью, заполненной углеродистой композицией. Ватсон (Watson) первым показал возможность использования резистора с мощностью 0,125 Вт как датчика давления в диапазоне 1–7 ГПа и выполнил калибровку резистора с номинальным значением начального сопротивления 470 Ом [9]. В отличие от коммерческих резисторов, имеющих электрические выводы длиной приблизительно 27 мм, датчик давления Allen Bradley имеет выводы длиной по 300 мм и специальное наружное изолирующее покрытие, что оказывается очень удобным при измерениях в различных средах, проявляющих в экспериментах высокую электрическую проводимость. Центральная резисторная, или пьезочувствительная часть этого датчика за счет покрытия имеет диаметр 2 мм (против 1,7 мм у прототипа) и длину как у прототипа — 4,2 мм. Наиболее часто используют датчики с номинальным начальным сопротивлением 470 Ом. В работе [8] отмечается, что при воздействиях с длительным нарастанием давления до контрольных значений, характерным для нагружения объектов падающим грузом, и резким, скачкообразным ударно-волновым изменением давления получаются практически одинаковые тарировочные зависимости

$$\Delta R/R_{\partial 0} = f_*(p_{TAP}), \text{ или } \bar{R} = (1 - \Delta R/R_{\partial 0}) = f(p_{TAP})$$

где ΔR — изменение сопротивления резистора, вызванное приложением к нему давления p_{TAP} ; $R_{\partial 0}$ — начальное значение сопротивления датчика.

В [4] приводится зависимость

$$p_{TAP} = 7,001 - 4,345\bar{R} + 0,364/\bar{R} - 8,4 \exp(-\bar{R}) + 0,07018$$

$$R = R_{\partial} / R_{\partial 0} = (R_{\partial 0} - \Delta P) / R_{\partial 0}; R_{\partial 0} \approx 470 \text{ см}$$

где R_{∂} — значение сопротивления резистора, отвечающее тарировочному значению давления p_{TAP} , измеряемому в ГПа.

Эта зависимость для датчиков с резисторами, номинальное значение сопротивления которых равно 470 см, отличается от той, что получена в более ранней работе [8], наличием последнего слагаемого, которое введено для уточнения результатов измерений в области сравнительно низких давлений (рис. 1).

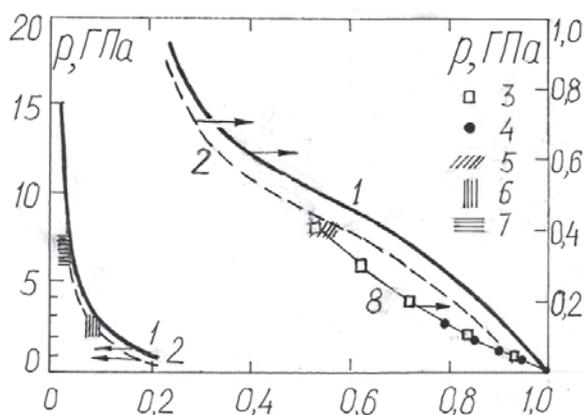


Рис.1. Результаты тарировки углеродистых резисторов с номинальным сопротивлением $R_{00} = 470 \text{ Ом}$: 1 – зависимость из [4]; 2 – зависимость из [8]; 3 – результаты [10]; 4, 5, 6 – результаты для резисторов Xicon (1–3 данные для резисторов Allen Bradley)

Полученные тарировочные функции используются для построения зависимостей от времени непрерывно изменяющегося давления p , действующего на датчик, на основании информации, отображающей динамику сопротивления резисторного пьезочувствительного элемента датчика ΔR , приравнивая мгновенное значение давления p значениям тарировочных давлений $p_{\text{тар}}$ ($p = p_{\text{тар}}$). Поэтому на рис. 1 индекс «ТАР» у обозначения давления опущен.

При анализе регистраций динамики давления углеродистыми датчиками необходимо не только знать тарировочную зависимость, но и принимать во внимание две особенности углеродистых резисторов объемного типа: ограниченную скорость появления ответной реакции (в виде изменения сопротивления) на ударно-волновое (скачкообразное) повышение давления и наличие гистерезиса во время разгрузки. Рис. 2 с результатами работы [3] иллюстрирует наличие этих двух особенностей. Все эти три характеристики датчика, конечно, зависят от состава углеродистой композиции, используемой в резисторе, а последние две характеристики, по-видимому, определяются еще и геометрическими параметрами резистора, которые существенно могут отличаться в зависимости от номинальной мощности резистора и корпорации, производящей эти элементы датчика.

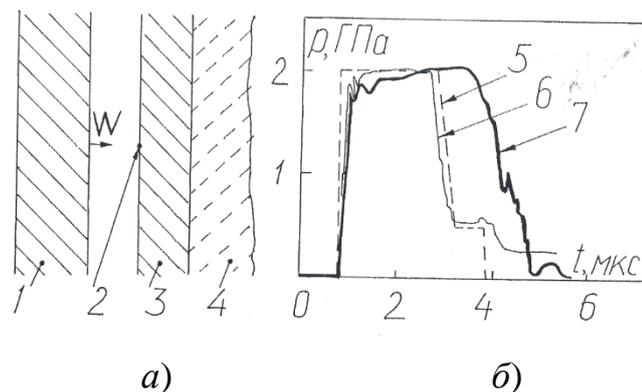


Рис. 2. а) Схема эксперимента и б) результаты определения давления на плоскости соударения ударника и мишени: 1 – ударник (пластина из органического стекла, или ПММА толщиной 10 мм), 2 – место расположения чувствительного элемента датчика давления, 3 – мишень из ПММА, 4 – пенопласт с импедансом, много меньшим, чем у ПММА, 5 – результат расчета с использованием гидродинамической модели ПММА (без учета его прочности), 6 – результат эксперимента с использованием манганинового датчика с плоским зигзагообразным чувствительным элементом из фольги, 7 – результат эксперимента с использованием углеродистого датчика Allen Bradley

В случае ограниченных возможностей приобретения углеродистых датчиков давления с резисторами корпорации Allen Bradley можно было бы использовать более доступные коммерческие углеродистые резисторы объемного типа, распространяемые дистрибьютором Xicon (в дальнейшем обозначаемые как резисторы Xicon), с номинальной мощностью 0,25 Вт или отечественные углеродистые резисторы объемного типа ТВО с номинальной мощностью 0,125 Вт, либо коммерческие резисторы пленочного типа корпорации SEI Electronics, производимые в Тайване.

Заключение о возможности использования в экспериментах вместо датчиков давления с резисторами Allen Bradley их аналогов — перечисленных доступных для приобретения коммерческих резисторов — и об условиях, в которых измерения этими заменителями рациональны, можно сделать, лишь найдя тарировочные зависимости и проведя оценки искажений передних и задних фронтов импульсов давлений, подлежащих регистрации. Геометрические и, следовательно, массовые характеристики этих «резисторов-заменителей» отличаются от таковых для резисторов Allen Bradley.

Так, резистор Xicon с номинальной мощностью 0,25 Вт представляет собой керамическую трубочку наружным диаметром 2,4 мм и длиной 6,5 мм. В углеродистый композит, заполняющий канал керамического корпуса резистора, впрессованы медные проводки диаметром 0,5 мм и длиной по 27 мм. Корпус отечественного резистора ТВО

представляет собой керамическую трубку длиной 8 мм прямоугольного поперечного сечения с наружными размерами 2,5 мм x 1,5 мм, канал которой имеет сечение, по форме близкое к прямоугольнику. В канале запрессована углеродистая смесь с концами двух медных проводников длиной по 27 мм.

Резисторы SEI Electronics (в дальнейшем — SEI Electronics резисторы) представляют собой сплошной стержень из керамики, цилиндрическая поверхность которого покрыта спиралью из пьезочувствительной пленки. Вблизи торцевых частей стержня на эту пленку нанесены колпачки, от дна которых отходят медные проводники длиной по 27 мм и диаметром 0,5 мм. Максимальный диаметр такого потенциального датчика равен 2,3 мм, а длина его резистивной части приблизительно равна 6 мм.

Экспериментальная часть

В настоящей работе основное внимание было уделено проверке возможности регистрации динамики давления резисторами Xicon с номинальным сопротивлением 470 Ом.

Тарировочные зависимости для углеродистых резисторов находились различными способами: статистическими и динамическими.

При статистическом способе тарировки резисторы обжимались машинным маслом, давление в котором нагнеталось с помощью ручного насоса до 300–1000 МПа и контролировалось стрелочным манометром. При этом сопротивление измерялось непосредственным образом считыванием показаний с цифровых приборов В7-16А и В7-4015.

При динамическом способе тарировки необходимые импульсы давления, с амплитудой, достигающей 100–150 МПа, создавались в полости объемом приблизительно 2 см^3 , заполненной машинным маслом, которое сжималось с помощью легкого поршня (массой в несколько граммов), подвергаемого удару падающим стальным цилиндром массой $m_y = 1 \text{ кг}$.

Более высокие давления создавались с помощью взрыва. При этом резисторы располагались либо практически на границе раздела блока из ПММА и нагружающего заряда ВВ, либо в воде на расстоянии 20-200 мм от поверхности приложения импульса давления, но в некоторых опытах резисторы помещались внутри заряда ВВ.

Давления, воздействующие на исследуемый резистор, либо измерялись с использованием в качестве эталонного датчика резисторов Allen Bradley с известными тарировочными характеристиками, либо находились расчетным образом.

Измерение сопротивления исследуемого резистора осуществлялось косвенным образом с помощью осциллографа Tektronix-TDS 2014 и простых схем преобразователей изменения сопротивления резистора в электрический регистрируемый сигнал, обозначаемых в работе как «Делитель» (рис. 3а) и «Мост Уитстона», или, просто, «Мост» (рис. 3б).

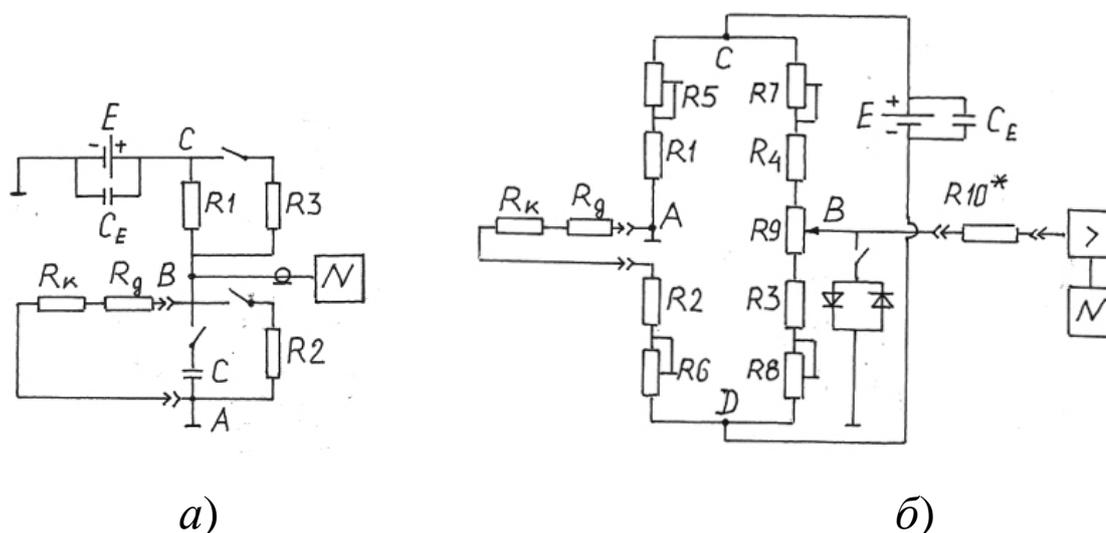


Рис. 3 Схемы регистрации изменения сопротивления пьезочувствительных резисторов R_δ : а) «Делитель» и б) «Мост» с использованием усилителя с коэффициентом усиления $K_{УС}$ и «делителем напряжения», ослабляющего сигнал в K_d раз

На этих схемах текущее, изменяемое сопротивление пьезочувствительного резистора обозначено R_δ , а сопротивление кабеля, длиной до 100 м обозначено R_k . Первая схема предназначена для измерений при взрывных импульсных давлений «средних» амплитуд (сотни МПа) и «больших» амплитуд (единицы ГПа). Схема «Мост» предназначена для регистрации импульсов давления различного происхождения и форм, но «малых» амплитуд (единицы и десятки МПа), вызывающих изменения сопротивления углеродистых резисторов, малость которых не могла бы быть скомпенсирована в случае использования схемы «делитель» большими коэффициентами усиления сигналов.

Схема «Делитель», показанная на рис. 3а, может функционировать в трех режимах регистрации сигналов. Если резистор R_1 электрически не шунтируется (замыкается) резистором R_3 , а точки A и B схемы не замыкаются резистором R_2 , то при очень резких изменениях сопротивление датчиков давлений с углеродистым резистором R_δ в начальной части осциллограммы сигнала наблюдается быстро затухающая осцилляция напряжения (электрический «звон»). Такой режим, с отключенными резисторами R_2 и R_3 , можно использовать для регистрации сигналов, соответствующих сравнительно медленному нарастанию давления в переднем фронте импульса.

Осцилляции можно сгладить при отключенных резисторах R_2 и R_3 , подключив к точкам A и B конденсатор C (второй режим). Наконец, ослабить проявления искажений прифронтных участков осциллограмм высокоамплитудными осцилляциями можно, уменьшив чувствительность схемы подключением к точкам A и B резистора R_2 . Для того чтобы избежать чрезмерного ослабления сигнала U_{AB} , следует шунтировать резистор R_1 резистором R_3 .

Отклонение осциллограммы от начального уровня напряжения (при $R_\partial = R_{\partial 0}$) на величину $U = U(t)$ при заданной ЭДС источника E позволяет найти значение $\bar{R} = R_\partial / R_{\partial 0}$, воспользовавшись решением системы уравнений:

$$\frac{U}{E} = R_{ABO} / (R_{BC} + R_{ABO}) - R_{AB} / (R_{BC} + R_{AB});$$

$$R_{ABO} = (R_{\partial 0} + R_k) R_2 / (R_{\partial 0} + R_k + R_2);$$

$$R_{AB} = (R_\partial + R_k) R_2 / (R_\partial + R_k + R_2);$$

$$R_{BC} = R_1 R_2 / (R_1 + R_3).$$

При использовании в качестве датчиков давления резисторов «Хисон» с номинальным значением начального сопротивления $R_{\partial 0} = 470$ Ом, резисторы R_1 , R_2 и R_3 имеют сопротивления: 465, 51,7 и 52,2 Ом, соответственно. Сопротивление кабеля R_k , соединяющего датчик давления с точками A и B схемы, может достигать нескольких Ом.

При регистрациях «средних» давлений, когда искажения начальных участков осциллограмм еще «приемлемо малы», а подключение шунтирующих резисторов сделало бы отклик $U_{AB} = U(t)$ на малое изменение сопротивления датчика давлений слишком малым, резисторы R_2 и R_3 не подключаются к точкам AB и BC . При этом при обработке осциллограмм полагается формально $R_2 = R_3 = \infty$. Заметим, что часто для нахождения значений R_∂ и $\bar{R} = R_\partial / R_{\partial 0}$ не решают систему уравнений, а сопоставляют осциллограмму процесса с серией значений (уровней) U/E , которую получают путем последовательного шунтирования датчика давления резисторами с калиброванными значениями сопротивлений.

Измерительные преобразователи с использованием в качестве основного элемента измерительного моста Уинстона применяют для того, чтобы в отсутствии регистрируемого воздействия начальный уровень выходного сигнала имел нулевое значение. При этом оказывается возможным получение отображения сигнала с нулевым начальным уровнем и некоторым последующим отклонением от этого уровня с использованием произвольно задаваемого коэффициента усиления. Электрическая схема «Мост» имеет некоторые незначительные осложнения, которые позволяют получить простейшее выражение для

нахождения измененного сопротивления пьезорезистивного датчика давления по электрическому отклику схемы U на это воздействие.

При подключении в схему нового, как правило, одноразового датчика давления, начальное сопротивление которого $R_{\partial 0}$ отличается от номинального значения 470 Ом, и возможном изменении длины кабеля и, соответственно, сопротивления R_k подстроечные резисторы позволяют сделать практически одинаковыми значения сопротивления плеч электрического моста AC , CB , BD и равными сумме сопротивлений, включенных между точками A и D , $R_{\partial 0} + R_k + R_2 + R_6 = R_N$. Эта процедура проводится с помощью омметра (схема переключения его на различные плечи моста не показана на рис. 3б), после чего с помощью очень небольших изменений сопротивлений подстроечного резистора R_9 и измерений милливольтметром проводится балансировка моста (выравнивание потенциалов в точках A и B). После такой балансировки и измерения отклонения осциллограммы от начального нулевого уровня $U = U(t)$ можно для нахождения текущего значения сопротивления резистора датчика давления $R_{\partial} = R_{\partial}(t)$ использовать формулы

$$\bar{R}(t) = \frac{R_{\partial}(t)}{R_{\partial 0}} = 1 - 4 \frac{R_N}{R_{\partial 0}} \bar{U}_{AB},$$

$$\bar{U}_{AB} = \frac{U(t)}{K_{УС} E} \frac{R_{10} + R_{ex}}{R_{ex}},$$

где R_{10} — сопротивление резистора ослабления сигнала, необходимого для сохранения линейности усиления; R_{ex} - входное сопротивление усилителя с коэффициентом усиления $K_{УС}$.

Введение в эту схему усилителя с коэффициентом усиления $K_{УС} = 100$ вызвано тем, что использованный осциллограф Tektronix-TDS 2024 не позволял получить осциллограммы хорошего качества при входных напряжениях в единицы милливольт. Поэтому из-за необходимости регистрировать столь низкие разности потенциалов U_{AB} между точками A и B предусмотрено стократное усиление сигналов с диагонали моста при задании на осциллографе калиброванных коэффициентов масштабирования в диапазоне 0,2–0,5 Вольт/деление.

Диодный предохранитель предотвращает попадание на вход усилителя сигналов с напряжением $U_{AB} > 500$ мВ. Значение сопротивления резистора R_{10} , образующего со входным сопротивлением усилителя ($R_{ex} = 10$ кОм) эффективный делитель напряжения, подбирается в зависимости от ожидаемого напряжения сигнала U_{AB} для обеспечения снижения амплитуды входного напряжения усилителя до приемлемого значения. Верхняя граница полосы пропускания усилителя составляла $f_0 = 20$ кГц.

Усилитель имел четырехканальное исполнение и предназначался в основном для измерений текущих сопротивлений углеродистых датчиков при квазистатических воздействиях стотомикросекундной и миллисекундной длительности на машинное масло в полости с тарируемым и эталонным датчиками давлений. Этот усилитель использовался также и в некоторых опытах, когда для измерений плавно меняющихся давлений в низкоамплитудных импульсах применялся уже оттарированный резистор Xicon.

Наличие регистраций изменения напряжения на входе осциллографа позволяет не только находить динамику сопротивления пьезочувствительного элемента датчика давления $R_\partial(t)$. Если давление, действующее на датчик, помещенный в полости, заполненной машинным маслом, создается путем сброса ударника на легкий поршень, сжимающий эту жидкость, то оказывается возможным находить искомые давления, используя особенности получаемых при этом осциллограмм (рис. 4). Из условия равенства изменения импульса тела, падающего с высоты H на поршень (к моменту его остановки), импульсу силы со стороны поршня, останавливающего этот ударник за время t_m , и допущения прямой пропорциональности мгновенных значений давлений в машинном масле и соответствующих им напряжений на входе осциллографа

$$p(t)/U(t) = K_U = const$$

следует, что

$$K_U = \frac{4m_y \sqrt{2gH}}{\pi d^2 J}; \quad J = \int_0^{t_m} U(t) dt,$$

где m_y — масса падающего ударника, g — ускорение свободного падения, d — диаметр канала, в который вдвигается поршень, создавая в масле давление p .

Рассчитанное таким образом значение K_U позволяет найти зависимость $p(t)$ и, сопоставив ее с текущим значением сопротивления $\bar{R}_\partial(t)$, найти тарировочную зависимость в виде $p = p(\bar{R}_\partial)$ или $\bar{R}_\partial = \bar{R}_\partial(p)$.

Результаты экспериментов

На основании проведенных опытов можно считать, что при увеличении давления квазистатическим образом до 100–150 МПа изменение сопротивления $\Delta R = R_\partial - R_{\partial 0}$ резисторов линейно связано с давлением p , его вызвавшим: $\Delta R/(R_\partial p) = const = K_d$. Для резисторов Allen Bradley значение этой константы получилось равным $1,62 \text{ ГПа}^{-1}$, для резисторов Xicon — $1,67 \text{ ГПа}^{-1}$, а для резисторов ТВО — $0,19 \text{ ГПа}^{-1}$. С увеличением

номинального значения $R_{\delta 0}$ чувствительность углеродистых датчиков давления Allen Bradley и Xicon несколько увеличивается.

Соответственно, для нахождения давления p в ГПа с учетом невысокой точности измерений в данной работе можно принять следующие зависимости (для давлений в диапазоне 0–0,1 ГПа):

$$p = (1 - \bar{R}) / 1,6 \quad \text{для Allen Bradley и Xicon};$$

$$p = (1 - \bar{R}) / 0,2 \quad \text{для резисторов ТВО}.$$

Возможный разброс коэффициентов чувствительности датчиков K_{δ} относительно средних значений 1,6 и 0,2 ГПа⁻¹ оценивается в 10–15 %.

Для SEI Electronics резисторов пленочного типа получилось минимальное значение константы $K_{\delta} = \Delta R / (R_{\delta} p)$ — ориентировочно 0,05 ГПа⁻¹ в диапазоне давления 0–60 МПа. Заметим, что для марганциновых датчиков (сопротивление которых увеличивается с ростом давления) коэффициент пьезочувствительности на порядок меньше: $K_{\delta}(p) = (2,3 - 2,7) \cdot 10^{-3}$ ГПа⁻¹.

Ветвь зависимости $K_{\delta}(p)$, получаемая на стадии уменьшения давления, наступающей после достижения некоторого конечного значения p_k на стадии роста давления, отклоняется от начальной зависимости $R_{\delta}(p)$. Если давление (после предварительного повышения до p_k) в течение секунд снизить до атмосферного, то сопротивление резистора будет превышать начальное значение $R_{\delta 0}$ на величину остаточного изменения сопротивления $\Delta R_{ост}$.

Для резисторов ТВО с $R_{\delta 0} = 470$ Ом значение $\Delta R_{ост} / (R_{\delta 0} p_{max})$ составляет 10–15 % от $\Delta R / (R_{\delta 0} p_{max})$. Здесь p_{max} — максимум значения давления, достигаемый на стадии его медленного нарастания, предвещающего резкое падение. После выдержки резистора при атмосферном давлении в течение 5–10 минут $\Delta R_{ост}$ уменьшается практически до нуля и повторная тарировка дает практически такой же результат, что и предыдущая. Для резисторов Allen Bradley и Xicon значения $\Delta R_{ост}$ не измерялись. Однако, судя по достаточно высокой степени симметричности переднего и заднего фронтов зарегистрированных импульсов (рис. 4), гистерезисом этих датчиков давлений при регистрациях давлений, уменьшающихся со скоростью порядка 0,1–1,0 МПа/мкс, можно пренебречь.

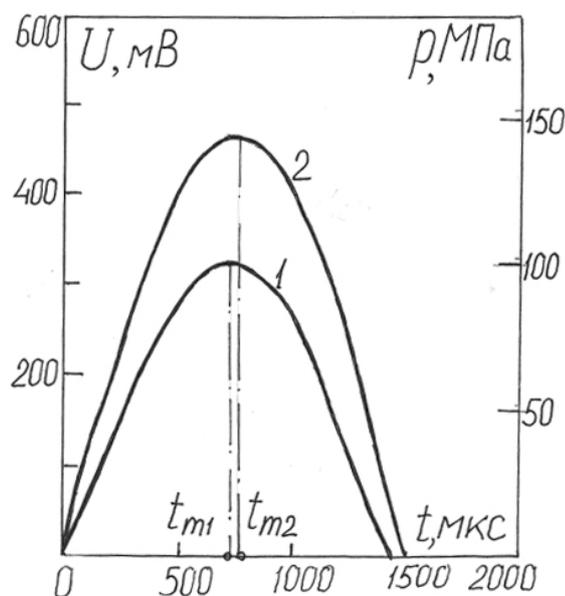


Рис. 4. Форма сигналов и результат их обработки при создании давления с помощью груза, сбрасываемого на «упруго» сжимаемое масло с пьезочувствительными резисторами Allen Bradley 1) и Xicon 2). (Объем масла в сборках с датчиками давления от опыта к опыту строго не воспроизводился)

Из-за отсутствия возможности использовать калиброванные ударно-волновые импульсы, полноценные в отношении тарировки датчиков давления, были проведены ориентировочные опыты с взрывным нагружением углеродистых резисторов Xicon. При этом резисторы помещались в воду, если воздействие оказывалось продуктами так называемой «уходящей детонационной волны» (рис. 5), либо непосредственно в заряд низкоплотного хорошо изученного ВВ (смеси гексогена с мипорой, рис. 6).

Линия 1 рис.5 отображает сигнал, который получен с использованием резистора Xicon, удаленного от границы воды со слоем пенопласта толщиной 20 мм на 5 мм (для записи сигнала использовался усилитель с верхней границей полосы пропускания $f_0 = 20$ кГц). Линия 2 – идеализированный расчетный импульс давления на поверхности воды (без учета искажений от пенопласта и от переходных процессов формирования детонационного фронта). При этом заштрихованная область 3 отображает диапазон уровней амплитудных давлений на воду, наблюдавшихся автором с использованием методик оптической и магнитоэлектрической регистрации параметров течения при средней плотности зарядов ГМ – $0,35$ г/см³

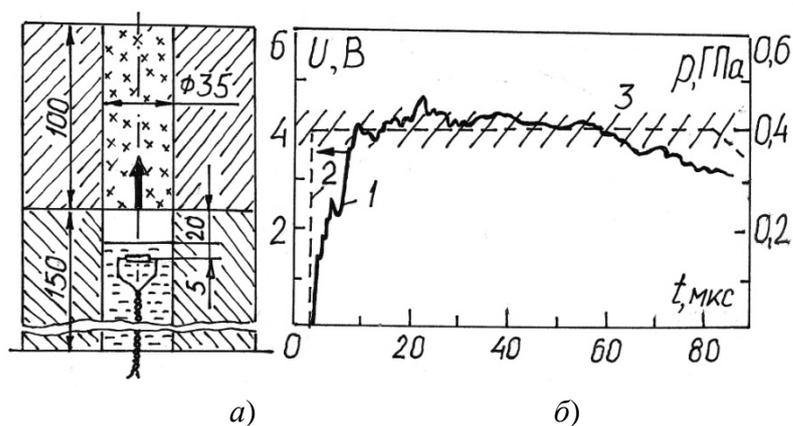


Рис. 5 (а) Схема эксперимента и (б) характеристики ударно-волнового нагружения воды продуктами «уходящей» детонационной волны заряда из смеси гексогена с мипорой (ГМ) со средней плотностью $0,35 \text{ г/см}^3$

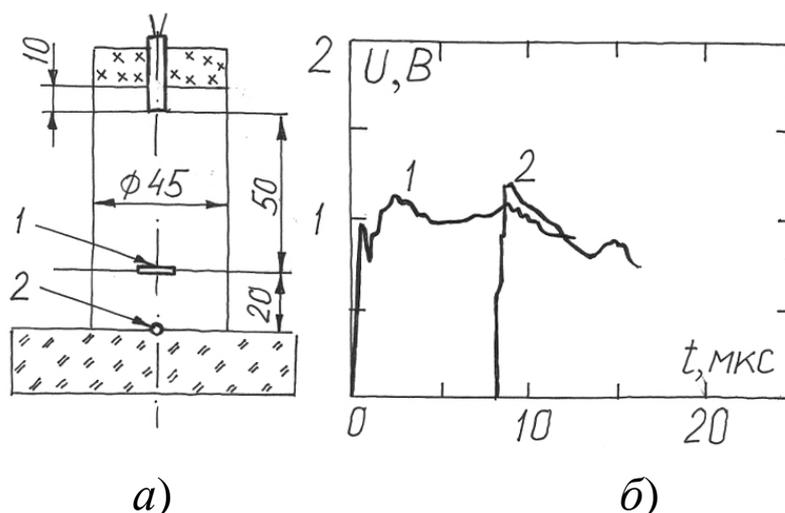


Рис. 6 а) Схема эксперимента с резисторами Xicon в заряде из порошкообразной смеси гексогена и мипоры плотностью $0,35 \text{ г/см}^3$, инициируемого электродетонатором №8 и расположенного на толстом листе из оргстекла (ПММА), и б) осциллограммы, полученные с одноименных резисторов 1 и 2

Значения давлений, действующих на датчики, находились расчетным образом. Результаты таких тарировочных опытов изображены на рис. 1 в виде зон, протяженность которых в направлении оси давлений и в направлении оси текущих сопротивлений датчиков отображает неопределенность соответственно роста давлений и измерений сопротивления датчиков в проведенных экспериментах. Отображения на рис. 1 оригинальных результатов тарировки резисторов Xicon и данных, полученных для датчиков Allen Bradley в [4] и в [10], позволяет заключить, что тарировочные характеристики резисторов Xicon можно принять такими же, как уточненные зависимости $p = p(\bar{R})$ для углеродистых датчиков давления на базе резисторов Allen Bradley с тем же номинальным значением начального сопротивления $R_{00} = 470 \text{ Ом}$. Эта уточненная

характеристика изображена тонкой линией до давления приблизительно 0,4 ГПа, а для больших давлений уже штриховой линией.

Полученная (принятая) таким образом тарировочная зависимость $p = p(\bar{R})$ для резисторов Xicon позволяет по измеренным значениям текущих сопротивлений датчиков находить давления с погрешностью приблизительно $\pm 10\%$ в области низких давлений (до 0,4 ГПа) и около $\pm 20\%$ при более высоких давлениях. При давлениях около 10 ГПа точность измерений становится неудовлетворительной.

Реальная погрешность измерения давления при больших скоростях его изменения во времени может быть существенно хуже приведенных значений: $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$.

Ухудшение точности измерения в передних фронтах импульсов давления обусловлено наложением проявлений газодинамической несогласованности материала датчика и контролируемой среды, запаздывания отклика датчика в виде изменения сопротивления на непосредственно воспринимаемое его поверхностью давление, эффектов возбуждения кратковременно действующих затухающих осцилляций на осциллограммах (электрического «звона»). Заметим, что газодинамический анализ влияния геометрических параметров датчиков на эффекты газодинамической несогласованности двух сред усложняется тем, что компактный цилиндрический пьезочувствительный резистор из-за его обтекания средой уже не является элементом лагранжева датчика в отличие от «пленочного» манганинового элемента. Поэтому можно ограничиться иллюстрациями влияния геометрических параметров резисторов Allen Bradley и Xicon в виде осциллограмм (рис. 7а, 7б) полученных при одновременном расположении двух разных типов датчиков в одном поперечном сечении заряда диаметром 25 мм, детонирующего в стальной трубе с толщиной стенки 5 мм.

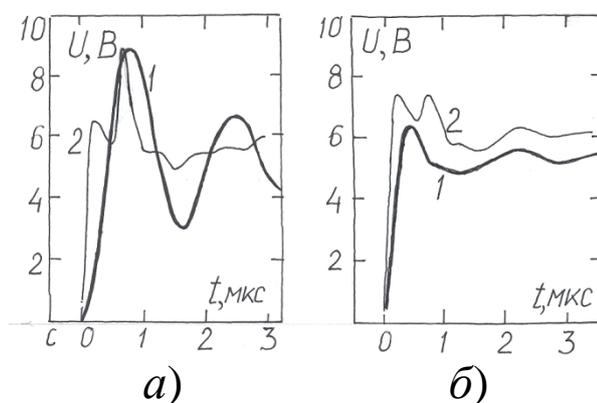


Рис. 7 Осциллограммы, полученные с датчиков Xicon (1), Allen Bradley (2), помещенных в одном поперечном сечении заряда а) из порошкообразного гексогена плотностью $0,8 \text{ г/см}^3$; и б) из порошкообразной смеси аммиачной селитры, алюминия, сахарной пудры и ТНТ плотностью $0,78 \text{ г/см}^3$

Сечения, в которых расположены датчики, удалены от листового ВВ, возбуждающего детонацию, на расстояние 80 мм.

На рис. 6 показана схема опыта и осциллограммы, полученные с использованием измерительно-преобразовательной схемы «Делитель» с подключенными шунтирующими резисторами R_2 и R_3 . Изменение формы осциллограмм в данном случае объясняется эволюцией реагирующего потока по мере распространения фронта инициирующей ударной волны от места контакта заряда ВВ с электродетонатором.

Скачок давления на фронте ударной волны с амплитудой более 2 ГПа, вызывающий резкое уменьшение сопротивления чувствительного элемента датчика Xicon, приводит к появлению осцилляций, затрудняющих интерпретацию получаемых осциллограмм (рис. 8).

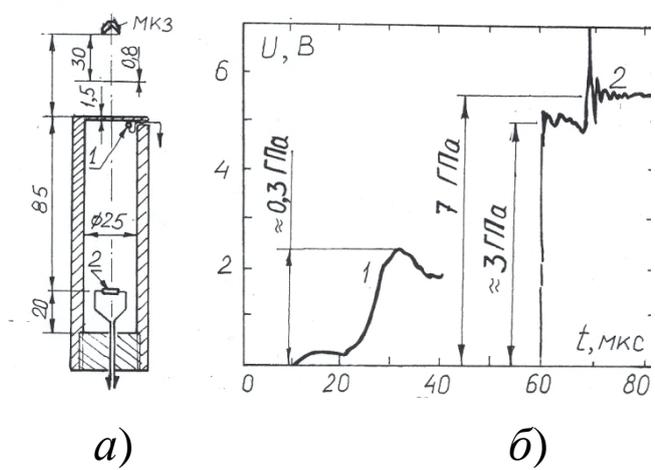


Рис. 8 а) Схема опыта по возбуждению детонации насыпного заряда из порошкообразной смеси аммиачной селитры, алюминия, сахарной пудры и тротила плотностью $0,78 \text{ г/см}^3$ [11] микрокумулятивным зарядом (МКЗ) и б) осциллограммы, полученные с использованием одностипных схем регистрации «Мост» (усилитель не использован: $K_U = 1$ и $R_{10} = 0$)

К значительным усложнениям при интерпретации результатов некоторых экспериментов и усложнениям алгоритмов получения необходимой информации приводит также гистерезис резисторов Xicon и ТВО. В качестве примера такого усложнения приведен результат одного опыта из серии, предназначенной для выяснения особенностей возбуждения детонации пористых смесей аммиачной селитры с алюминием и добавками органических невзрывчатых и взрывчатых компонентов (рис. 9).

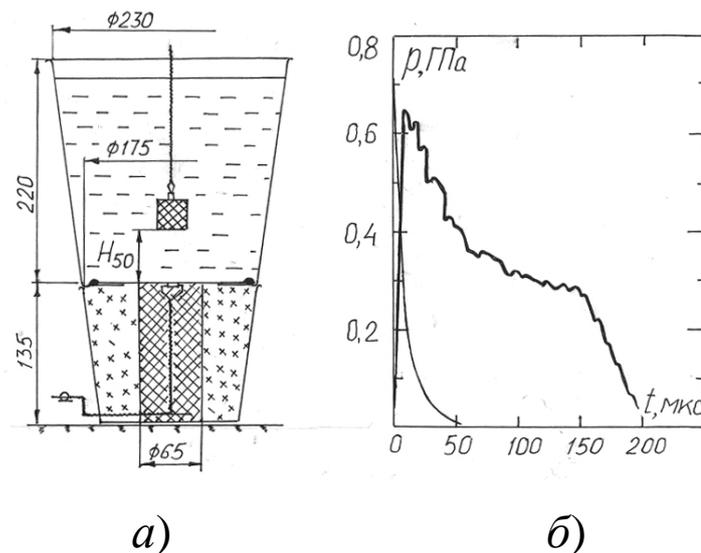


Рис. 9 а) Схема эксперимента по нахождению критических условий инициирования детонации в заряде из порошкообразной смеси аммиачной селитры, алюминия, сахарной пудры и тротила плотностью $0,78 \text{ г/см}^3$, помещенного в противоразгрузочный блок из смеси древесных опилок и речного песка, и б) временные профили давления на расстоянии H_{50} от активного заряда на основе ТЭНа плотностью $1,52 \text{ г/см}^3$ диаметром 30 мм и высотой 32 мм

На рис. 9б толстой линией показана зависимость давления от времени на верхнем торце исследуемого заряда, нагружаемого через слой воды высотой H_{50} взрывной волной от детонирующего активного заряда на основе ТЭНа фиксированных размеров и массы. При высоте слоя воды $H_{50} = 52 \text{ мм}$ с вероятностью 50 % наблюдается детонация исследуемого заряда и с вероятностью 50 % — «отказ», при котором после эксперимента на стальной пластине-свидетеле, или идентификаторе детонации остается нижняя часть исследуемого заряда, а остальная часть в диспергированном и, возможно, частично прореагировавшем состоянии разбросана по сторонам. Результат осциллографирования, показанный на рис. 9, получен при «отказе». Тонкой линией показан волновой профиль давления на том же расстоянии H_{50} от активного заряда, но в случае замены противоразгрузочного контейнера и ампулы с ВВ бассейном с водой. Этот профиль получен расчетом с использованием программного комплекса «Стерео». На вопрос о том, что вызывает различие приведенных кривых: гистерезис углеродистого резистора или проявления частичной реакции разложения ВВ, не пришедшее к появлению детонационной волны в исследуемом заряде, строго говоря, можно было бы ответить, если бы был проведен дополнительный опыт. В этом дополнительном опыте следовало бы заменить исследуемый заряд пористым инертным веществом с такой же динамической сжимаемостью, что и испытываемое ВВ.

Заключение

Проведенные опыты и сопоставление полученных при этом результатов регистрации динамики давления в контролируемых средах показали возможность при некоторых схемах экспериментов вместо углеродистых датчиков давления корпорации Allen Bradley использовать более доступные и менее дорогие углеродистые резисторы. Потребность в этом обычно возникает при проведении множественных отладочных экспериментов на стадиях подготовки к основному высокоинформативному эксперименту. Наибольшие сложности возникают при использовании высокочувствительных резисторов Xicon при определении «высоких» давлений на переднем фронте ударно-волновых импульсов. Большие скачки сопротивлений этих резисторов, вызываемые резкими подъемами давления, приводят к кратковременным сильным осцилляциям на переднем фронте осциллограмм. При регистрации таких импульсов давлений могут оказаться более предпочтительными отечественные резисторы ТВО, имеющие меньшую чувствительность, но в то же время позволяющие использовать простейшие электрические схемы измерителей-преобразователей без применения импульсных источников напряжения, свойственных измерениям с манганиновыми датчиками. Безусловным достоинством углеродистых резисторов как датчиков давления является возможность использования их как отметчиков моментов прохождения передних фронтов импульсов давлений через контролируемые точки объектов исследования.

Автор выражает искреннюю благодарность за поддержку в работе Павлу Андреевичу Уртьеву.

Список литературы

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: Монография/Под общ. ред. доктора физико-математических наук М.В. Жерноклетова. Саров. ФГУП РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2003. - 403с.
2. Могилев В.А., Новиков С.А., Файков Ю.И. Техника взрывного эксперимента для исследования механической стойкости конструкций. Монография. Саров. ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2007. - 215с.
3. Asay B.W., Campbell A.W., Ginsberg M.Y., Ramsay J.B. Detonation Characteristics of Gun Propellants// The Ninth Symposium (International) on Detonation. Preprints of Papers to be Presented at 9-th Symposium (Int.) on Detonation. 1989. v1. p.233-239.
4. Baker P.Y., Delaney Y.E. Impact-initiated Detonative and Nondetonation Reactions in Confined Tritonal, Composition H-6 and PBXN-109//11-th Symposium (International) on Detonation. USA. 1998. p. 254-265.

5. Held M. Test Setup For Instrumented Initiation Test//Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2000.25 p. 49-53.
6. Niles A.M., Garcia F., Greenwood D.W., Forbes J.W., Tarver C.M., Chidester S.K., Garza R.G., Switzer L.L. Measurement of Low Level Explosives Reaction in Gauged Multi-Dimensional Steven Impact Test//Shock Compression of Condensed Matter-2001. Edited by M.D. Furnish, N.N. Thadhani, and Y. Horie. American Institute of Physics. 2002. p. 886-889.
7. Garcia F., Forbes J.W., Tarver C.M., Urtiew P.A., Greenwood D.W., Vandersall K.S. Pressure Wave Measurements from Thermal Cook-Off of an HMX Based High Explosive PBX 9501//Shock Compression of Condensed Matter-2001. Edited by M.D. Furnish, N.N. Thadhani, and Y. Horie. American Institute of Physics. 2002. p. 882-885.
8. Ginsberg M.J., Asay B.W. Commercial carbon composition resistor as dynamic stress gauges in difficult environments./Review of Scientific Instruments. 1991. v.62. №9 p. 2218-2227.
9. Watson R.W. Gauge for Determining Shock Pressures//Review of Scientific Instruments. 1967. v.38. p. 978.
10. Cunningham B., Vandersall K.S., Niles A.N., Greenwood D.W., Garcia F., Forbes J.W., Wilson W.H. Carbon Resistor Pressure Gauge Calibration at Low Stresses//Shock Compression of Condensed Matter-2001. Edited by M.D. Furnish, N.N. Thadhani, and Y. Horie. American Institute of Physics. 2002. p. 1137-1140.
11. Андреев С.Г., Сычев В.Ю., Чернов А.И. Испытания составов на основе смеси нитрата аммония и алюминия с органическими добавками//Химическая физика. - 2008. - том 27. - №8. С.61-69.

Studying feasibility of replacing Allen-Bradley carbonic pressure sensors with over-the-counter resistors

77-30569/303217

01, January 2012

Andreev S.G.

Bauman Moscow State Technical University
andreeff2007@mail.ru

Linear calibration dependencies were obtained under static stress with pressures up to 100 MPa for the following resistor types: Xicon, SEI Electronics, Russian TBO resistors and reference Allen-Bradley resistors. Under dynamic loads with pressures up to 0.5 GPa, calibration dependency for a Xicon resistor (rated resistance 470 Ohm, dissipation power 0.25 Wt) is shown to nearly match that of an Allen-Bradley sensor. Feasibility of using Allen-Bradley carbonic sensor calibration dependencies for Xicon resistors is asserted for the pressure range of 5 to 7 GPa. Authentic oscilloscope records of various symmetry flows in homogeneous and heterogeneous mediums, including explosive ones, are provided in order to testify feasibility of using over-the-counter Xicon resistors instead of well-known Allen-Bradley sensors.

Publications with keywords: [impact](#), [pressure gage](#), [over-the-counter resistor](#), [calibration](#), [explosive loading](#), [detonation initiation](#)

Publications with words: [impact](#), [pressure gage](#), [over-the-counter resistor](#), [calibration](#), [explosive loading](#), [detonation initiation](#)

Reference

1. In: M.V. Zhernokletova (Ed.), Methods of Research of the properties of materials under intense dynamic loading: Monograph, Sarov, FGUP RFIA Ts — VNIIEF, 2003, 403 p.
2. Mogilev V.A., Novikov S.A., Faikov Iu.I., The technique of an explosive experiment for investigation of mechanical durability of constructions: Monograph, Sarov, FGUP RFIA Ts–VNIIEF, 2007, 215 p.
3. Asay B.W., Campbell A.W., Ginsberg M.Y., Ramsay J.B., Detonation Characteristics of Gun Propellants, in: Preprints of Papers to be Presented at 9-th Symposium (International) on Detonation, 1989, vol. 1, pp. 233-239.
4. Baker P.Y., Delaney Y.E., Impact-initiated Detonative and Nondetonation Reactions in Confined Tritonal, Composition H-6 and PBXN-109, in: Proceedings of the 11-th Symposium (International) on Detonation, USA, 1998, pp. 254-265.

5. Held M., Test Setup for Instrumented Initiation Test, Propellants, Explosives, Pyrotechnics 25 (2000) 49-53.
6. Niles A.M., Garcia F., Greenwood D.W., Forbes J.W., Tarver C.M., Chidester S.K., Garza R.G., Switzer L.L., Measurement of Low Level Explosives Reaction in Gauged Multi-Dimensional Steven Impact Test, in: M.D. Furnish, N.N. Thadhani, Y. Horie (Ed.), Shock Compression of Condensed Matter-2001, American Institute of Physics, 2002, pp. 886-889.
7. Garcia F., Forbes J.W., Tarver C.M., Urtiew P.A., Greenwood D.W., Vandersall K.S., Pressure Wave Measurements from Thermal Cook-Off of an HMX Based High Explosive PBX 9501, in: M.D. Furnish, N.N. Thadhani, and Y. Horie (Ed.), Shock Compression of Condensed Matter-2001, American Institute of Physics, 2002, pp. 882-885.
8. Ginsberg M.J., Asay B.W., Commercial carbon composition resistor as dynamic stress gauges in difficult environments, Review of Scientific Instruments 62 (9) (1991) 2218-2227.
9. Watson R.W., Gauge for Determining Shock Pressures, Review of Scientific Instruments 38 (1967) 978.
10. Cunningham B., Vandersall K.S., Niles A.N., Greenwood D.W., Garcia F., Forbes J.W., Wilson W.H., Carbon Resistor Pressure Gauge Calibration at Low Stresses, in: M.D. Furnish, N.N. Thadhani, and Y. Horie (Ed.), Shock Compression of Condensed Matter-2001, American Institute of Physics, 2002, pp. 1137-1140.
11. Andreev S.G., Sychev V.Iu., Chernov A.I., Tests of compositions based on mixtures of ammonium nitrate and aluminum with organic additives, Khimicheskaja fizika 27 (8) (2008) 61-69.