

**К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ
УДАРНЫХ ВОЛН ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ УРОВНЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ
ВО ФРОНТЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
ПРИ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЯХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВЗРЫВА**

**ON THE ISSUE OF APPLICATION OF DIGITAL SHOCK WAVE VELOCITY
METERS TO REGISTER THE LEVEL OF EXCESSIVE PRESSURE
IN THE AIR SHOCK WAVE FRONT DURING GROUND TESTING
OF DEVICES FOR EXPLOSION PROTECTION**

По представлению чл.-корр. РАРАН А.И. Михайлина

А.С. Пучков, И.В. Гук, А.И. Спивак, С.Н. Васильева

АО «НПО Спецматериалов»

A.S. Puchkov, I.V. Guk, A.I. Spivak, S.N. Vasileva

Рассмотрен вопрос измерения избыточного давления во фронте воздушной ударной волны с использованием цифровых измерителей скорости ЦИС-5 как альтернативы использованию пьезоэлектрических датчиков давления ПД-7-1,5М. Установлено, что погрешность определения избыточного давления во фронте воздушной ударной волны с использованием цифровых измерителей скорости ЦИС-5 составляет 27–51 %.

Ключевые слова: воздушная ударная волна, избыточное давление во фронте воздушной ударной волны, методы определения избыточного давления во фронте воздушной ударной волны.

The issue of measuring excess pressure in the front of an air shock wave using digital speed meters TsIS-5 as an alternative to using piezoelectric pressure sensors PD-7-1.5M is considered. It has been established that the error in determining excess pressure in the front of an air shock wave using digital speed meters TsIS-5 is 27–51 %.

Keywords: air shock wave, excess pressure in the air shock wave front, methods for determining excess pressure in the air shock wave front.

В современных условиях, характеризующихся проявлением противоправных действий террористической направленности с использованием зарядов взрывчатого вещества (ВВ), особую актуальность приобретает использование устройств для защиты от взрыва типа «Фонтан» [1], предназначенных для уменьшения фугасного и термического воздействия взрыва в ближней области за счет реализации эффекта

Гельфанда–Сильникова [2, 3], заключающемся в быстром затухании, размытии и выполаживании фронта воздушной ударной волны (ВУВ) с диссипацией энергии взрыва многофазной газожидкостной релаксационной средой (диспергентом) [4]. Кинограммы, иллюстрирующие эффективность использования устройств для защиты от взрыва типа «Фонтан-2», представлены на рис. 1 и 2 [5, 6]. На рис. 1 представлена

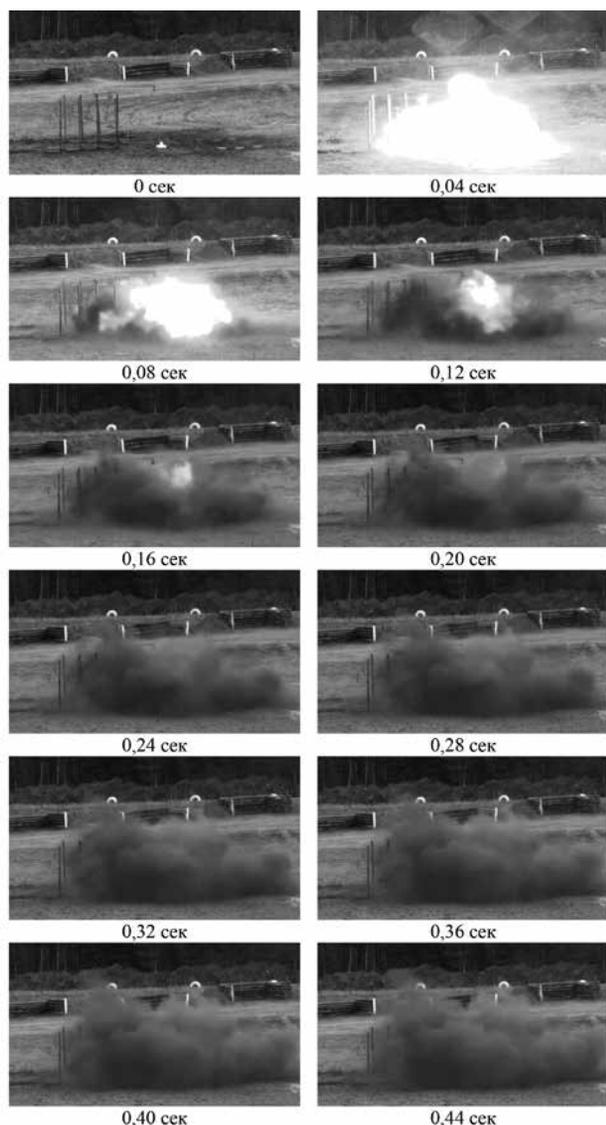


Рис. 1. Кинограмма подрыва открытого заряда ТНТ массой 0,5 кг

кинограмма подрыва открыто расположенного заряда ТНТ массой 0,5 кг, на которой явно присутствует термическое действие взрыва в ближней области в виде открытого пламени. На рис. 2 представлена кинограмма подрыва аналогичного заряда ТНТ, расположенного в устройстве для защиты от взрыва типа «Фонтан-2» модели 05У, из анализа которой следует значительное уменьшение термического воздействия взрыва в ближней области.

Основной особенностью изделий типа «Фонтан» является наполнение его специальной эмульсией — диспергентом, обладающим

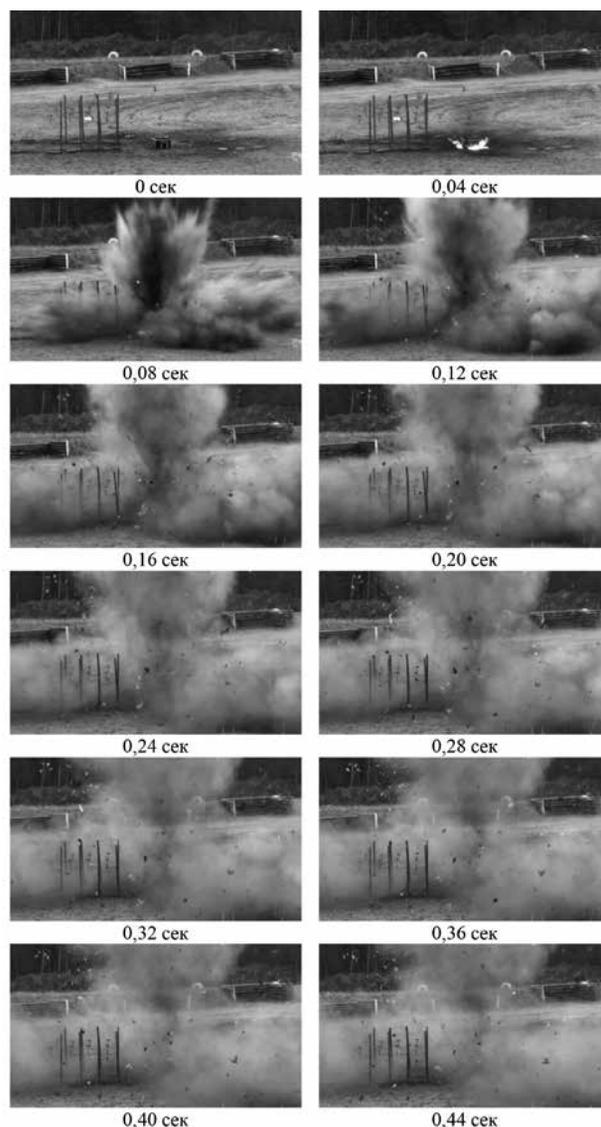


Рис. 2. Кинограмма подрыва заряда ТНТ массой 0,5 кг с использованием устройства для защиты от взрыва «Фонтан-2» модели 05У

высокой релаксирующей способностью. Физико-механические свойства диспергента оказывают определяющее влияние на эффективность устройства защиты от взрыва. От них зависит доля диссипированной энергии взрыва, определяемой аномально высокой кинематической релаксацией в процессе диспергирования эмульсии и преобразования ее в кинетическую энергию капель [4].

Одним из основных этапов разработки и контроля качества в процессе серийного производства устройств для защиты от взрыва являются полигонные испытания.

При полигонных испытаниях устройств для защиты от взрыва оценивают их эффективность и расстояние от источника взрыва, на котором уровень избыточного давления во фронте ВУВ не превышает безопасный по баротравме уровень для взрослого здорового человека (50 кПа) [7].

Существует ряд методических подходов к определению уровня избыточного давления во фронте ВУВ, одними из которых являются [8]:

- метод прямых измерений с использованием преобразователей давления различного типа, например пьезодатчиков с записью пьезотоков на скоростные регистраторы [7, 9, 10]. Такой метод обеспечивает регистрацию давлений с высокой точностью. К недостаткам метода можно отнести разрушение пьезодатчиков в процессе испытаний, особенно на стадии спада давления, что не позволяет, например, осуществлять запись импульса давления при больших давлениях во фронте ВУВ. Кроме этого, для монтажа пьезодатчиков необходимы жесткие несущие конструкции с элементами для защиты от поражающих элементов, специальные меры для защиты измерительных кабельных цепей от воздействия ВУВ и поражающих элементов;

- метод косвенных измерений, основу которого составляют результаты измерения скоростей ударных волн, которые измеряют с большой точностью. Метод хорошо зарекомендовал себя при определении уровней давления во фронте ВУВ средней и большой интенсивности. Метод характеризуется применением цифровых измерителей скорости проходящей ВУВ, устанавливаемых непосредственно на поверхности земли, отсутствием дополнительного оборудования и измерительных линий для обеспечения работоспособности цифровых измерителей скорости [11];

- метод косвенных измерений на основе использования стержней Гопкинсона для определения значительных давлений во фронте ВУВ с возможностью оценки импульса давления [12].

В качестве основного метода при полигонных испытаниях устройств для защиты от взрыва типа «Фонтан» используется метод прямых измерений с использованием пьезоэлектрических датчиков давления ПД-7-1,5М, цифрового многоканального осциллографа на базе пер-

сонального компьютера и платы сбора информации L-783 [7].

Датчик давления ПД-7-1,5М, представленный на рис. 3, состоит из преобразователя давления (1) и предварительного усилителя (2). Преобразователь давления состоит из пьезоэлектрического элемента диаметром 7 мм, закрепленного на металлической трубке через изолирующую прокладку. На пьезоэлемент нанесено теплозащитное покрытие толщиной 1,5 мм, устраняющее влияние пироэффекта в рабочем диапазоне давлений ударных волн и предохраняющее пьезоэлемент от климатических и механических воздействий.

Основные технические характеристики пьезоэлектрических датчиков давления ПД-7-1,5М [7]:

- форма чувствительного элемента сферическая (коэффициент чувствительности датчиков зависит от направления воздействия);
- максимальная амплитуда давления — 1,5 МПа;
- частотный диапазон — 2...20 000 Гц;
- диаметр чувствительного элемента — 5...7 мм.

Однако в связи с отмеченными недостатками, присущими методу прямых измерений параметров во фронте ВУВ, возникла необходимость апробации метода косвенных измерений параметров во фронте ВУВ при полигонных испытаниях устройств для защиты от взрыва на основании результатов измерения скоростей ударных волн.

Измерение избыточного давления (амплитуды) ΔP прямой ВУВ при помощи цифровых измерителей скорости основано на следующей связи между соотношением давлений на переднем фронте ВУВ (интенсивностью ВУВ) J и числом Маха M , характеризующим в данном случае скорость распространения переднего фронта ВУВ [1–3, 9]:



Рис. 3. Вид пьезоэлектрического датчика давления ПД-7-1,5М: 1 — преобразователь давления; 2 — предварительный усилитель

$$J = (1 + \varepsilon)M^2 - \varepsilon, \quad (1)$$

где $J = (P + \Delta P)/P$ — интенсивность прямой ВУВ;

P — давление перед фронтом ВУВ (атмосферное давление, если ВУВ распространяется в предварительно не возмущенной среде);

$$\varepsilon = (\gamma - 1)/(\gamma + 1);$$

где γ — показатель адиабаты воздуха (для слабых и умеренных ВУВ, т.е. при $J \leq 10$, без ущерба точности измерений и вычислений принимается $\gamma = 1,4$);

$M = D/a$ — число Маха ВУВ;

D — скорость распространения переднего фронта ВУВ;

$a = \sqrt{\gamma RT}$ — скорость звука в окружающей среде;

T — абсолютная температура воздуха перед ударной волной, К;

$R = 287,055$ Дж/(кг·К) — газовая постоянная воздуха.

Чувствительные элементы цифрового измерителя скорости, находящиеся друг от друга на расстоянии L по направлению распространения прямой ВУВ, подвергаются воздействию переднего фронта ВУВ через промежуток времени Δt , связанный со скоростью D :

$$D = L/\Delta t.$$

Из соотношения (1) и пояснений к нему следует, что фиксация этого промежутка времени позволяет установить не только среднюю скорость переднего фронта ВУВ, но и ее усредненную амплитуду на этом промежутке при различных значениях температуры воздуха и атмосферного давления:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{(1 + \varepsilon)P(D^2 - a^2)}{a^2} = \\ &= \frac{2P \left[(L/\Delta t)^2 - \gamma RT \right]}{(\gamma + 1)RT}. \end{aligned} \quad (2)$$

В том случае, если линия, соединяющая чувствительные элементы цифрового измерителя скорости, составляет с фронтом ВУВ угол σ ,

отличный от прямого, то соотношение (1) для определения интенсивности ударной волны выглядит следующим образом [1–3, 9]:

$$J = (1 + \varepsilon)M^2 \sin^2 \sigma - \varepsilon,$$

и приводит к следующей формуле измерения амплитуды косой ВУВ:

$$\Delta P = \frac{2P \left[(L \sin \sigma / \Delta t)^2 - \gamma RT \right]}{(\gamma + 1)RT}. \quad (3)$$

Оценка избыточного давления ΔP прямой или косой ВУВ в соответствии с формулами (2) и (3) требует высокой точности измерения промежутка времени Δt , определяющей скорость ВУВ (особенно при малых амплитудах ударной волны, когда разность скорости переднего фронта ВУВ и скорости звука невелика). Эффекты, связанные с неравновесностью процессов в ударных волнах, отклонением воздуха от термодинамического уравнения состояния идеального газа, изменением его показателя адиабаты и газовой постоянной, при анализе ударных волн малой и умеренной интенсивности, напротив, являются пренебрежимо малыми.

Для реализации метода косвенных измерений при полигонных испытаниях устройств для защиты от взрыва типа «Фонтан» на основании результатов измерения скоростей ударных волн были использованы цифровые измерители скорости ЦИС-5, основные характеристики которых представлены в табл. 1 [13].

Исследование возможности использования методики, основанной на применении цифровых измерителей скорости ЦИС-5, для регистрации уровня избыточного давления во фронте ВУВ при испытаниях устройств для защиты от взрыва было проведено в полигонных условиях с использованием устройств для защиты от взрыва серии «Фонтан-2», вид которых представлен на рис. 4, а характеристики представлены в табл. 2 [4].

Исследования проводились методом сравнительных испытаний с регистрацией давления во фронте ВУВ с использованием двух параллельных измерительных цепей, схема которых представлена на рис. 5.

Основу измерительной цепи № 1 (направления 1 и 2, рис. 5) составляли цифровые

Характеристики цифрового измерителя скорости ЦИС-5

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Диапазон измеряемых интервалов времен, мкс	от 0 до 999
2	Погрешность определения интервала времени, мкс	$\pm (\tau \text{ изм. } 10^{-3} + 1)$
3	Диапазон измеряемых скоростей распространения воздушных ударных волн, м/с	от 350 до 1550
4	Относительная среднеквадратическая погрешность измерения скорости распространения воздушной ударной волны, %	< 3
5	Диапазон измеряемой величины максимального избыточного давления на фронте ударной волны, Па	$(0,49 - 24,5) \cdot 10^5$
6	Относительная среднеквадратическая погрешность измерения величины максимального избыточного давления, %	< 5
7	База измерения, мм	$200 \pm 0,5$



Рис. 4. Вид устройств для защиты от взрыва серии «Фонтан-2»: а — модель 05У; б — модель 10У

Таблица 2

Габаритно-массовые характеристики устройств для защиты от взрыва «Фонтан-2»

Модель изделия	Наружные габаритные размеры $\pm 10 \%$, мм	Размеры внутренней полости $\pm 10 \%$, мм	Внутренний объем не более, куб. дм	Масса не более, кг	Нормативная масса локализуемого заряда ТНТ, кг
05У	440×440×300	220×220×180	12	20	0,5
10У	530×530×320	280×280×160	17	25	1,0

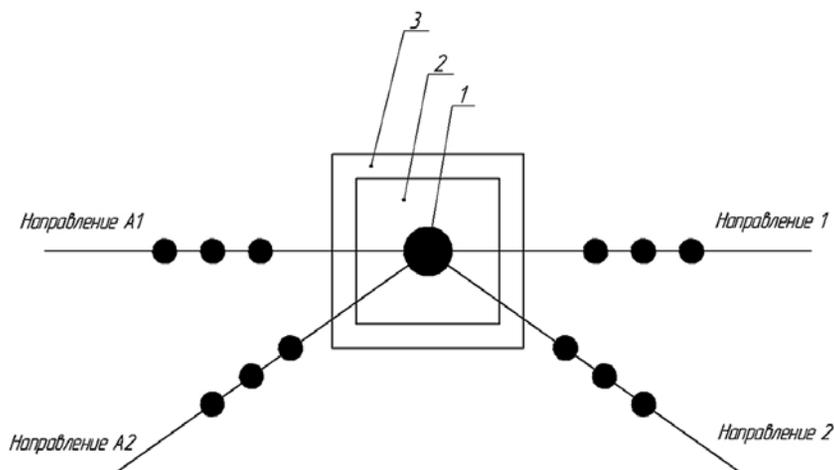


Рис. 5. Схема проведения эксперимента (вид сверху): 1 — заряд ВВ; 2 — средство для защиты от взрыва «Фонтан-2»; 3 — плита; направление 1, 2 — размещение цифровых измерителей скорости ЦИС-5; направление А1, А2 — размещение датчиков давления ПД-7-1,5М

измерители скорости ЦИС-5, схема размещения которых представлена на рис. 6, а внешний вид — на рис. 7. Расстояния до ЦИС-5 от внешних габаритов образцов устройств серии «Фонтан-2» в направлениях 1 и 2 представлены в табл. 3.

Основу измерительной цепи № 2 (направления А1 и А2, рис. 5) составляли пьезоэлектрические датчики давления ПД-7-1,5М, цифровой многоканальный осциллограф на базе персонального компьютера и платы сбора информации L-783. Схемы размещения датчиков в направлениях А1 и А2 представлены на рис. 8 и 9, а расстояния от внешних габаритов устройства «Фонтан-2» до датчиков давления ПД-7-1,5М указаны в табл. 3.

Испытания проводились подрывом зарядов ТНТ массой 0,5...2 кг, размещенных в устройствах для защиты от взрыва «Фонтан-2». Подрыв зарядов ТНТ осуществлялся электрическим способом на стальной плите, вкопанной в грунт под нулевой уровень.

Вид мишенной обстановки с размещенными в ней зарядом ТНТ, датчиков давления ПД-7-1,5М и цифровых измерителей скорости представлен на рис. 10.

Перед проведением исследований были проведены межлабораторные сличительные испытания пьезоэлектрических датчиков давления ПД-7-1,5М с использованием пьезоэлектрических датчиков давления СП-10, в ходе которых была подтверждена удовлетворительная

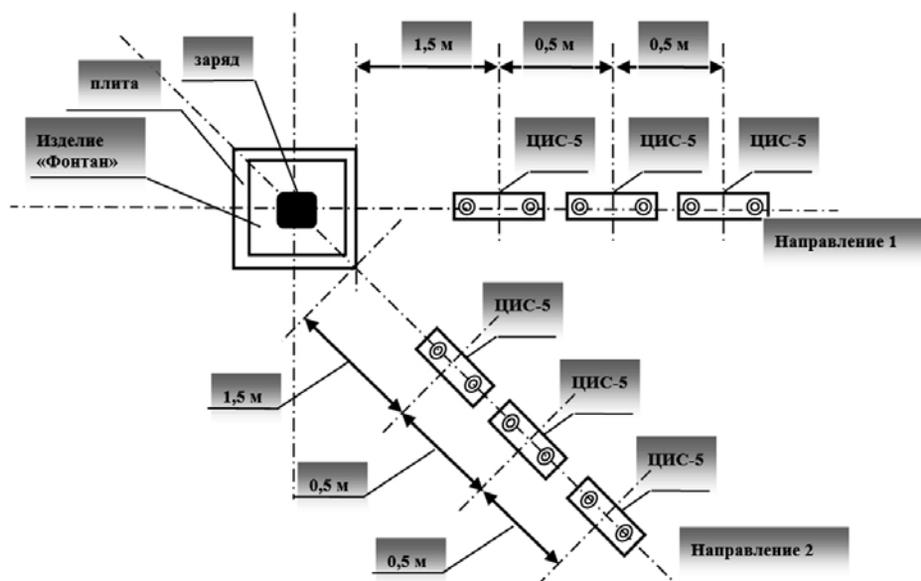


Рис. 6. Схема размещения цифровых измерителей скорости ЦИС-5 при проведении испытаний

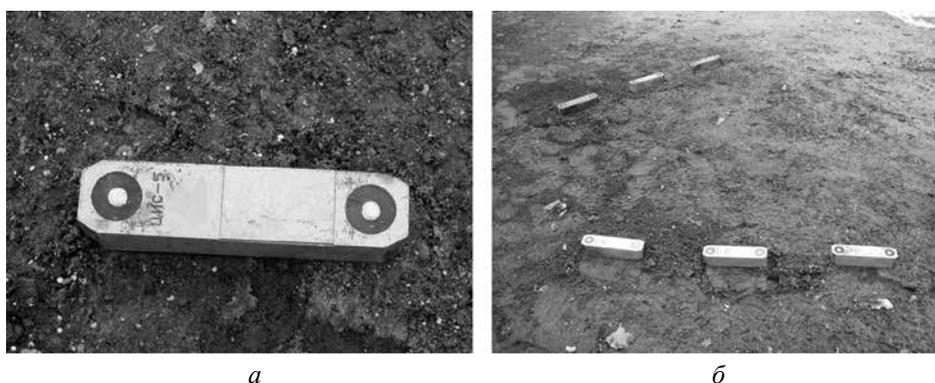


Рис. 7. Вид цифрового измерителя скорости ЦИС-5 (а) и вид размещения цифрового измерителя скорости ЦИС-5 в мишенной обстановке в направлениях 1 и 2 (б)

Расстояния до датчиков давления ПД-7-1,5М и цифровых измерителей скорости ЦИС-5 от края устройства для защиты от взрыва «Фонтан-2»

Масса заряда ТНТ, кг	Вид испытаний	Расстояния до датчиков ПД-7-1,5М и ЦИС-5 от края «Фонтан-2», м					
		направления А1, А2 (датчики ПД-7-1,5М)			направления 1, 2 (ЦИС-5)		
		номера датчиков ПД-7-1,5М; ЦИС-5					
		1; 5	2; 6	3; 7	1; 5	2; 6	3; 7
0,5	Подрыв заряда в «Фонтан-2» модели 05У						
1,0	Подрыв заряда в «Фонтан-2» модели 05У	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5
	Подрыв заряда в «Фонтан-2» модели 10У						
2,0	Подрыв заряда в «Фонтан-2» модели 10У						

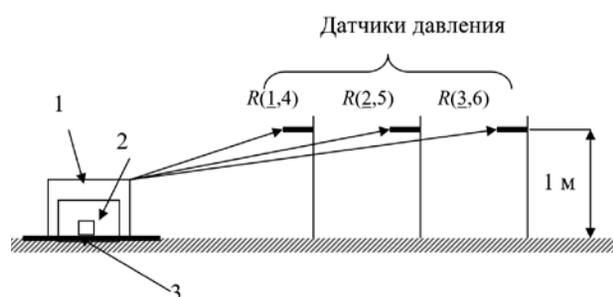


Рис. 8. Схема расположения (вид сбоку) заряда, устройств для защиты от взрыва «Фонтан-2» и датчиков давления ПД-7-1,5М в направлениях А1, А2: 1 — устройство для защиты от взрыва «Фонтан-2»; 2 — заряд ТНТ; 3 — плита

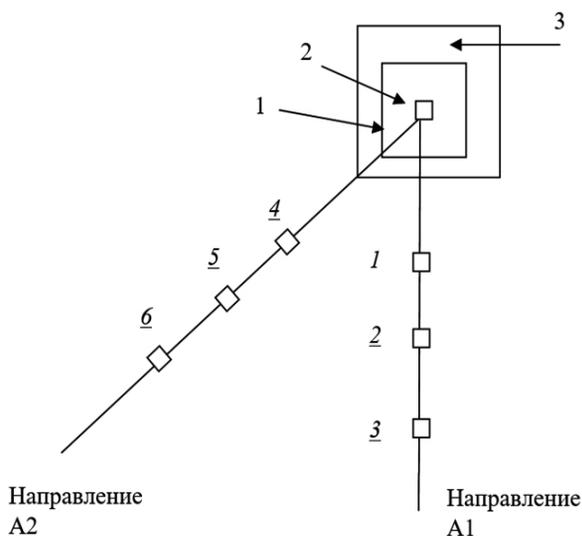


Рис. 9. Схема расположения (вид сверху) заряда, устройств для защиты от взрыва «Фонтан-2» и датчиков давления ПД-7-1,5М: 1–6 — номера позиций датчиков давления ПД-7-1,5М; 1 — устройство для защиты от взрыва «Фонтан-2»; 2 — заряд ТНТ; 3 — стальная плита

сходимость результатов [5]. Перед проведением серии экспериментов проводилась градуировка пьезоэлектрических датчиков давления ПД-7-1,5М.

При проведении испытаний фиксировались уровни избыточного давления во фронте ВУВ на удалении 1,5; 2,0; 2,5 м от заряда ТНТ пьезоэлектрическими датчиками давления ПД-7-1,5М в направлениях А1 и А2, и цифровыми измерителями скорости ЦИС-5 в направлениях 1 и 2 [14, 15].



а



б

Рис. 10. Вид мишенной обстановки: а — вид открыто расположенного заряда ТНТ в мишенной обстановке; б — вид заряда ТНТ, размещенного в устройстве для защиты от взрыва «Фонтан-2»

В результате обработки экспериментальных данных получены статистические модели [16] зависимости избыточного давления во фронте воздушной ударной волны от расстояния до заряда ТНТ с использованием метода наименьших квадратов. При этом было рассмотрено несколько видов функций $y = f(x, a, b, \dots)$ и выбрана функция, для которой суммарная погрешность

$$\sum_{i=1}^n [f(x_j, a, b, \dots) - y_i]^2$$

оказалась минимальной [17].

Вид статистических моделей зависимости избыточного давления во фронте воздушной ударной волны от расстояния до заряда ТНТ представлен в табл. 4.

Таблица 4

Вид статистических моделей зависимости избыточного давления во фронте воздушной ударной волны от расстояния до заряда ТНТ

№ п/п	Средство измерения избыточного давления во фронте ВУВ	Вид статистической модели	Коэффициенты модели		Среднее отклонение, %	Средне-квадратическое отклонение	Коэффициент корреляции
			a	b			
Подрыв заряда ТНТ массой 0,5 кг в «Фонтан-2» модели 05У							
1	Датчики ПД-7-1,5М направление А1	$Y = a + bx$	106,33	-31,00	1	0,24	0,9998
2	Датчики ПД-7-1,5М направление А2	$Y = a + bx$	83,00	-21,00	5	2,12	0,9707
3	Датчики ЦИС-5 направление 1	$Y = a + b/x$	-70,38	290,51	2	1,34	0,9991
4	Датчики ПД-7-1,5М направление 2	$Y = a + bx$	99,33	-24,00	1	0,47	0,9988
Подрыв заряда ТНТ массой 1,0 кг в «Фонтан-2» модели 05У							
5	Датчики ПД-7-1,5М направление А1	$Y = a + bx$	134,67	-32,00	5	3,77	0,9607
6	Датчики ПД-7-1,5М направление А2	$Y = a + bx$	137,00	-34,00	6	4,24	0,9563
7	Датчики ЦИС-5 направление 1	$Y = a + b/x$	130,62	549,48	3	4,37	0,9973
8	Датчики ПД-7-1,5М направление 2	$Y = a + b/x$	17,46	226,84	2	1,46	0,9983
Подрыв заряда ТНТ массой 1,0 кг в «Фонтан-2» модели 10У							
9	Датчики ПД-7-1,5М направление А1	$Y = a + bx$	94,00	-19,00	1	0,71	0,9958
10	Датчики ПД-7-1,5М направление А2	$Y = a + bx$	110,33	-26,00	3	1,89	0,9845
11	Датчики ЦИС-5 направление 1	$Y = a + b/x$	-93,27	453,06	2	2,33	0,9900
12	Датчики ПД-7-1,5М направление 2	$Y = a + bx$	168,67	-43,00	1	0,24	0,9999
Подрыв заряда ТНТ массой 2,0 кг в «Фонтан-2» модели 10У							
13	Датчики ПД-7-1,5М направление А1	$Y = a \exp(b/x)$	45,34	2,29	6	0,65	0,9678
14	Датчики ПД-7-1,5М направление А2	$Y = a + b/x$	-34,17	299,69	2	2,62	0,9968
15	Датчики ЦИС-5 направление 1	$Y = x/(a + bx)$	-0,01	0,01	1	0,01	0,9995
16	Датчики ПД-7-1,5М направление 2	$Y = a + bx$	365,33	-97,00	1	0,24	0,9999

Примечание — область определения аргумента от 1,5 до 2,5 м

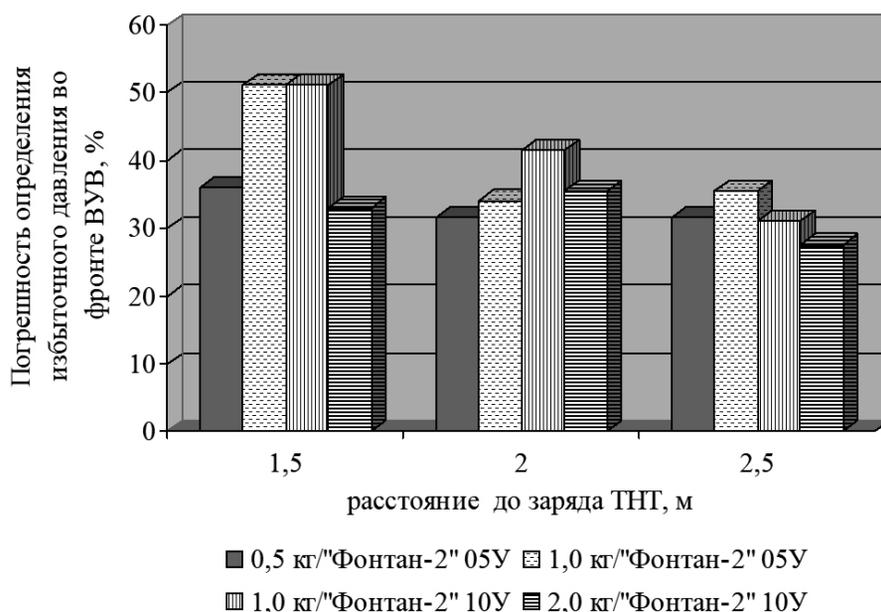


Рис. 11. Погрешности определения избыточного давления во фронте ВУВ цифровыми измерителями скорости ЦИС-5

Для оценки погрешностей определения избыточного давления во фронте ВУВ цифровыми измерителями скорости ЦИС-5 в сравнении с пьезоэлектрическими датчиками давления ПД-7-1,5М экспериментальные данные в направлениях А1, А2, а также в направлениях 1, 2 были осреднены для каждого расстояния от заряда ТНТ, каждой массы заряда ТНТ и каждой модели устройства для защиты от взрыва «Фонтан-2», а затем вычислялись собственно погрешности определения избыточного давления во фронте ВУВ цифровыми измерителями скорости ЦИС-5, которые представлены на рис. 11.

Анализ результатов, представленных на рис. 11, показывает, что использование методики косвенных измерений для определения уровня избыточного давления во фронте ВУВ в диапазоне 30–00 кПа, основанной на применении цифровых измерителей скорости ЦИС-5, нецелесообразно, поскольку полученные результаты значительно отличаются от результатов, полученных с использованием методики прямых измерений на основе пьезоэлектрических датчиков давления ПД-7-1,5М (погрешности определения избыточного давления во фронте ВУВ находятся в диапазоне 27–51 %).

Полученные результаты можно объяснить следующими обстоятельствами.

Известно [9], что избыточное давление во фронте ВУВ пропорционально квадрату скорости фронта ударной волны v^2 и разности $(1 - c_0^2 / v^2)$, где c_0 — скорость звука. Эти обстоятельства требуют для получения величины избыточного давления во фронте ВУВ с приемлемой погрешностью весьма большой точности измерения величины v , особенно близкой к скорости звука. Так, например, для получения величины избыточного давления во фронте ВУВ с погрешностью $\pm 5\%$ при подрыве заряда ВВ массой 1 кг на расстоянии 2 м требуется отсчет времени прихода ударных волн к двум соседним датчикам с точностью до 10^{-6} с, что не в полной мере выполняется при использовании цифровых измерителей скорости ЦИС-5.

Литература

1. Сильников М.В., Гельфанд Б.Е., Артамонов В.С. и др. Технические средства подавления и обезвреживания взрывных устройств. Изд-во СПб политехнического университета. СПб.: 2005. 158 с.
2. Сильников М.В., Гельфанд Б.Е. Фугасное действие взрыва. СПб.: Изд-во «Астерион», 2007. 250 с.
3. Сильников М.В., Гельфанд Б.Е. Поражающие факторы взрыва СПб.: Изд-во «Астерион», 2005. 169 с.

4. Сильников М.В., Артамонов В.С., Герасимов Н.В., Пучков В.А. Технические средства противодействия взрывам. СПб.: ООО «Первый издательско-полиграфический холдинг», 2006, 336 с.
5. Васильев Н.Н., Дмитриев В.Я., Спивак А.И. и др. Отчет о полигонных испытаниях по оценке эффективности устройств для защиты от взрыва «Фонтан» при подрыве усиленных зарядов ТНТ. СПб., ЗАО «НПО Специальных материалов». 45 с.
6. Сильников М.В., Васильев Н.Н., Дмитриев В.Я. и др. Экспериментальное исследование снижения фугасного действия взрыва «Фонтан» при срабатывании усиленных зарядов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 11–12. С. 28–36.
7. Методика № 14-07/13 проведения измерений избыточного давления во фронте воздушной ударной волны с использованием пьезоэлектрических преобразователей. СПб., ЗАО «НПО Специальных материалов», 2013. 8 с.
8. Определение давления и импульса ударных волн, распространяющихся в воздухе или жидкости. <https://helpiks.org6-77541.html?ysclid=lmldjd47f578830689> (дата обращения: 27.12.23).
9. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва; отв. ред. В.В. Адушкин. М.: Наука, 2004. 440 с.
10. Коротков А.И. Некоторые результаты измерения давления взрыва вблизи от заряда взрывчатого вещества // Физика взрыва. 1953. № 2. С. 76–103.
11. Завриев А.С. Методика определения максимального избыточного давления ударной волны по измеренным величинам скорости ее фронта // Физика взрыва. 1953. № 2. С. 104–135.
12. Способ измерения характеристик взрыва заряда взрывчатого вещества в ближней зоне и устройство для его осуществления: пат. 2658080 Рос. Федерация: МПК G01L5/14, F42B35/00; заявитель и патентообладатель ФКП «НИИ Геодезия», заяв. 2017132623 от 19.09.2017; опубл. 19.06.2018, Бюл. № 17.
13. <https://pandia.ru/text/78/416/7491.php?ysclid=lmlbp09ikb2573966> (дата обращения: 27.12.23).
14. Васильев Н.Н., Дмитриев В.Я., Спивак А.И. и др. К вопросу исследования закономерностей снижения уровня избыточного давления во фронте воздушной ударной волны устройствами для защиты от взрыва «Фонтан» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9–10. С. 61–64.
15. Васильев Н.Н., Дмитриев В.Я., Спивак А.И. и др. К вопросу снижения фугасного действия взрыва устройствами для защиты от взрыва «Фонтан» при срабатывании усиленных зарядов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 3–4. С. 106–112.
16. Коняхин И.А. Статистическое моделирование оптико-электронных систем. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2011. 119 с.
17. Коломиец Л.В., Пократова Н.Ю. Метод наименьших квадратов. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 32 с.