



## **МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВО ФРОНТОВОЙ ОБЛАСТИ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН В ВОЗДУХЕ**

**Леонид Евтерев<sup>2</sup>, Сергей Косяков<sup>1</sup>, Виктор Осоловский<sup>2</sup>**

### **РЕЗЮМЕ**

На основе анализа опытных данных о взрывах в воздухе делается вывод о том, что представление о взрывном процессе как ударно-волновом не соответствует действительности. Предлагается метод восстановления по измеренному избыточному давлению реального закона его изменения во фронтовой области сильных взрывных волн в воздухе.

**Ключевые слова:** эпюра избыточного давления, единичный импульсный отклик, восстановление сигнала

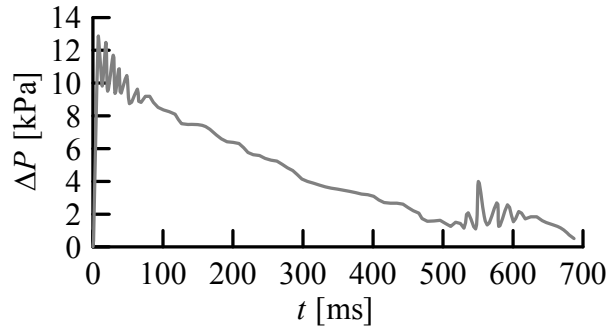
Вопросы параметров и формы эпюры избыточного давления воздушной взрывной волны (ВВВ), включая и ее фронтовую область, достаточно хорошо изучены на расстояниях  $R > 50$  м от центра взрыва вблизи поверхности Земли. Здесь по аналогии с классическими работами (Ландау и Лившиц, 1954; Зельдович и Райзер, 1966) под фронтом ВВВ будет пониматься область течения, в которой параметры течения изменяются от начального (невозмущенного) состояния до своего максимального значения. В меньшей степени изучен фронт взрывной волны на небольших удалениях от центра взрыва  $R < 50$  м, где давление нарастает до максимума за очень короткий промежуток времени.

Это замечание относится прежде всего к волнам, формируемым при маломощных взрывах. Высокая динамичность нагружения во фронтовой области при таких взрывах приводит к существенным искажениям при использовании средств измерения и регистрации избыточного давления. Искажения проявляются на экспериментальных эпюрах в виде сильных осцилляций (переколебаний) в случаях, когда динамические характеристики измерительной системы не соответствуют амплитудно–временным характеристикам процесса. Пример такой эпюры избыточного давления представлен на рисунке 1.

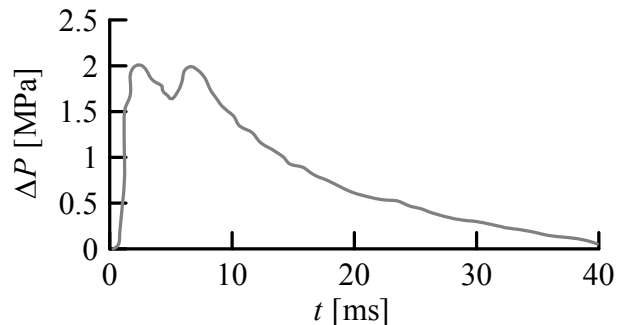
Один из путей исследования фронтовой области взрывной волны состоит в анализе экспериментальных данных, полученных при проведении взрывов большой мощности,  $W \geq 10^6$  кг ТНТ ( $W$  — эквивалентная мощность взрыва заряда тротила), (Адушкин и Христофоров, 2004; Broyles, 1954). Из-за большого масштаба явления и соответствующей большой длительности процесса нарастания давления до максимума ( $2 \div 3$  мс и более) средства измерения и регистрации взрывной волны, обладая ограниченными динамическими характеристиками (Кабыченко и др., 2004), оказываются в состоянии без упомянутых искажений прописать закон изменения во времени давления во фронте взрывной волны. В дальнейшем посредством масштабирования по закону энергетического подобия можно перестроить полученный профиль давления на случай взрыва небольшой мощности.

<sup>1</sup> Corresponding author: 12 Central Research Institute, Ministry of Defense, e-mail: [ksi1972.02@mail.ru](mailto:ksi1972.02@mail.ru)

<sup>2</sup> 12 Central Research Institute, Ministry of Defense



**Рис. 1. Экспериментальная осциллограмма взрывной волны на приведенном расстоянии  $R_* = 9,97 \text{ м/кг}^{1/3}$ , зарегистрированная самописцем давления СД-725, (Адушкин и Христофоров, 2004)**



**Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма взрывной волны на приведенном расстоянии  $R_* = 0,7 \text{ м/кг}^{1/3}$ , зарегистрированная аппаратурой ИД-2И с датчиком ДД-10 и свето–лучевым осциллографом Н-119, (Адушкин и Христофоров, 2004)**

Для примера на рисунке 2 показана достоверно зарегистрированная эпюра избыточного давления при взрыве 1000 тонн ТНТ. Аппаратура ИД-2И работает на несущей частоте 10 кГц, имеет согласованный выход на гальванометр МОВ2 IV типа. Частотный диапазон гальванометра составляет  $0 \div 600$  Гц, что соответствует длительности нарастания переходной характеристики  $t_S \leq 0,583$  мс. В представленной же осциллограмме время нарастания давления до максимума составляет  $t_G \approx 2,5$  мс, а характерная частота исследуемого процесса порядка 200 Гц. Очевидно, что вблизи от центра взрыва, где измерительная система «заваливает» фронт волны, время нарастания давления до максимума  $t_G$  на зарегистрированной эпюре должна совпадать с длительностью нарастания переходной характеристики  $t_S$  системы. Соответственно, выполнение условия  $t_G > t_S$  означает достоверность записи изменения давления во фронте ВВВ.

Результаты обработки опытных данных по длительности фронта взрывной волны  $t_G$  в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва  $R$ , подтверждающие данный вывод, представлены на рисунке 3. Из этих данных следует, что «полочки» по временам нарастания действительно воспроизводят переходную характеристику системы с  $t_S$ . В частности, для измерительной системы на основе датчика давления ДД-10 и усилителя ИВП-С длительность переходной характеристики составляет  $t_S = 62,5$  мкс, что соответствует собственной частоте колебаний измерительной системы  $f_0 = 8$  кГц. Для измерительных систем на основе датчиков РСВ М106В и РСВ М137А23, а также усилителя заряда РСВ 480С02 длительности переходных характеристик составили  $t_S = 25$  мкс,

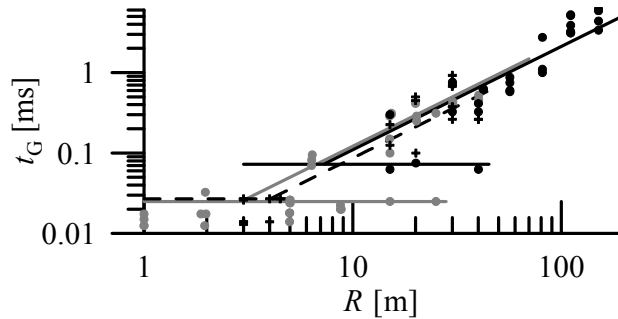


Рис. 3. Время нарастания давления во фронтальной области эпюры взрывной волны: ● – ДД-10 и ИВП-С; + – PCB M106B и PCB 480C02; ■ – PCB M137A23 и PCB 480C02

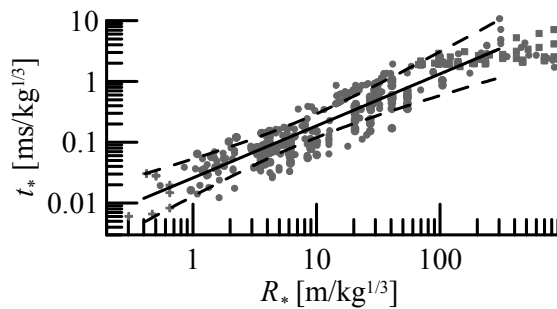


Рис. 4. Время нарастания давления во фронтальной области взрывной волны: ● – взрыв в воздухе ( $W = 3 \cdot 10^{-3} \div 6 \cdot 10^7$  кг ТНТ), (Адушкин и Христофоров, 2004; Broyles, 1954; Evtarev & Kosyakov, 2008; Рыбнов и др., 2004); + – взрыв в воздухе ( $W = 4 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$  кг ТНТ), (Фортов, 2002); ■ – лазерный и электрический пробой ( $W \sim 10^{-8}$  кг ТНТ), (Чумаков и др., 2003; Аверьянов, 2008); — – зависимость (1); --- – 95% доверительный интервал

что соответствует собственной частоте колебаний  $f_0 = 20$  кГц. По мере удаления от центра взрыва при  $t_G \gg t_S$  система регистрирует монотонное в среднем увеличение длительности фронта взрывной волны. На рисунке средние изменения величины  $t_G$ , зарегистрированные указанными измерительными системами, обозначены соответствующими линиями —, — и ---.

Статистическая обработка опытных данных в диапазоне приведенных расстояний ( $0,4 < R_* < 400$ ) м/кг<sup>1/3</sup> ( $R_* = R/W$ ) для взрывных источников различной мощности выявила интересный факт зависимости среднего приведенного времени нарастания  $t_* = t_G/q^{1/3}$  избыточного давления до своего максимального значения в фронте от приведенного расстояния (рис. 4, коэффициент корреляции 0,933)

$$t_* = 0,026 \cdot R_*^{0,855}. \quad (1)$$

Обращает на себя внимание тот опытный факт, что измерительные системы в некоторых случаях фиксируют длительность фронта  $t_G$  ВВВ, равную длительности своей переходной характеристики  $t_S$  даже на тех удалениях, где они же дают показания, попадающие на участок монотонного нарастания длительности фронта. В этой связи рисунок 3 иллюстрирует эффект «обострения» (в противоположность эффекту «завала») фронта ВВВ, когда абсолютный максимум давления измерительная система регистрирует на собственном колебании за время  $t_S$ , в несколько раз меньшее времени  $t_G$  в реальном процессе. Данный искажающий эффект повсеместно

проявляется при регистрации избыточного давления различными измерительными системами на расстояниях, меньших 50 метров до центра взрыва даже тогда, когда паспортные данные первичных измерительных преобразователей формально соответствуют амплитудно-временным характеристикам процесса.

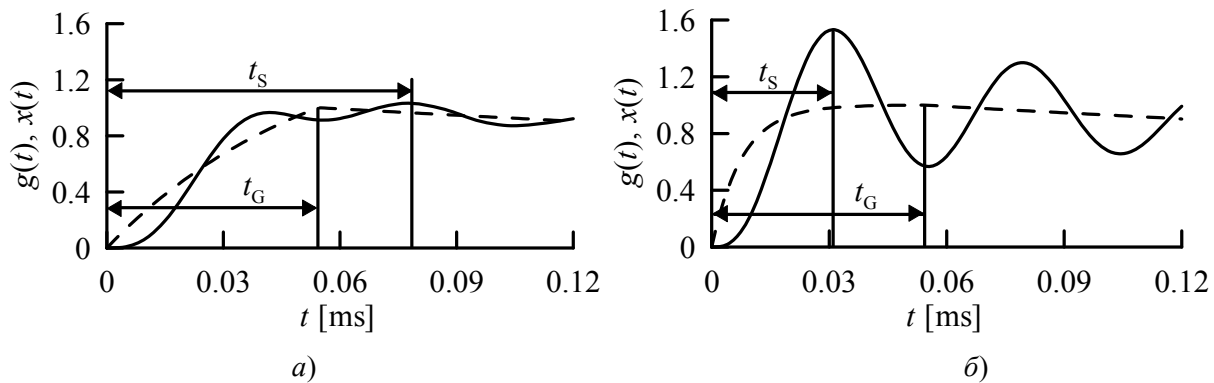
Для выяснения причины указанного явления проанализируем данные рисунка 5. Здесь показаны результаты расчета реакции упоминавшейся выше измерительной системы на основе датчика РСВ М106В и усилителя заряда РСВ 480С02 на внешнее вынужденное колебание. В качестве модели измерительной системы рассматривался линейный осциллятор с одной степенью свободы, описываемый дифференциальным уравнением

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \omega_0^2 x = g(t), \quad (2)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  — круговая собственная частота колебаний измерительной системы,  $k = 0,15 \cdot \omega_0$  — коэффициент демпфирования осциллятора. Отклик измерительной системы  $x(t)$  на вынужденное колебание  $g(t)$  рассчитывался по интегралу свертки

$$x(t) = \int_0^t E(t - \tau) \cdot g(\tau) d\tau \quad (3)$$

где  $E(t)$  — единичный импульсный отклик гармонического осциллятора. При этом длительность фронта  $t_G$  вынужденного колебания  $g(t)$  оставалась постоянной, но изменялась крутизна нарастания давления до максимума. Из сравнения следует, что при одной и той же величине  $t_G$  по мере увеличения крутизны фронта сигнала  $g(t)$  амплитуда первого переколебания отклика осциллятора  $x(t)$  пропорционально увеличивается. В случае возникновения интенсивных переколебаний (рис. 5, б) измерительная система регистрирует «время нарастания  $t_S$ », существенно меньшее фактического времени нарастания  $t_G$ . Кроме этого искажению подвергается и амплитуда — её значение может превышать амплитуду исходного сигнала на 60 %.



**Рис. 5. Влияние формы испытательного сигнала на реакцию линейного осциллятора: --- – вынужденное колебание  $g(t)$ ; — – собственные колебания измерительной системы  $x(t)$**

Для устранения указанных искажений и восстановления реального закона изменения во времени избыточного давления во фронтовой области взрывных волн в воздухе необходимо решить обратную задачу нахождения  $g(t)$  по зарегистрированному сигналу  $x(t)$ . Такая задача, как известно, является некорректной. В данной работе в качестве регуляризирующего оператора (процедуры) для фронтовой области используется задание формы сигнала  $g(t)$  в рамках

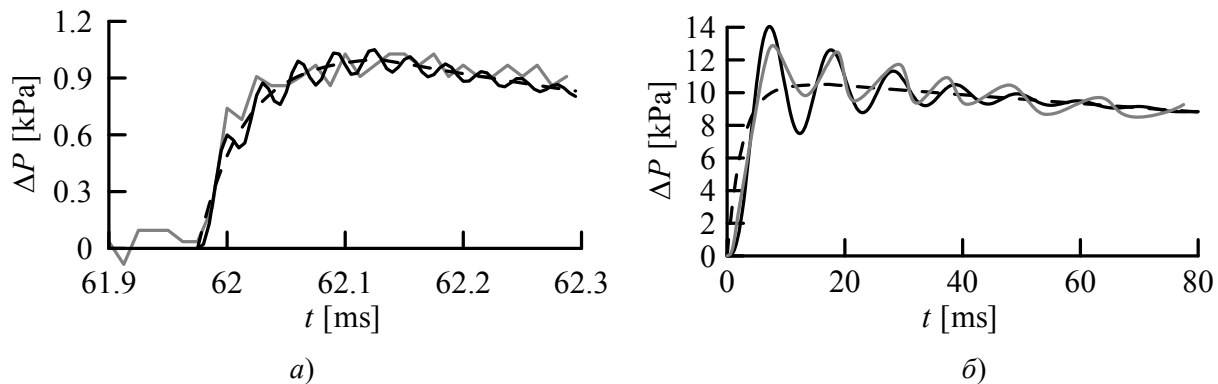
однопараметрического семейства функций. Это семейство получено из точного решения для структуры фронтальной области, найденного посредством интегрирования уравнений НЛТП-модели (Evtarev & Kosyakov, 2008) в одномерном плоском случае. Данная модель позволяет удовлетворительно воспроизводить в расчетах «размытие» взрывной волны. Указанное решение имеет вид

$$g(t) = \Delta P(t) = \frac{\Delta P_+}{1 - e^{-\lambda \Delta G}} (1 - e^{\lambda \xi}), \quad (4)$$

где  $\xi = R - Dt$  — бегущая переменная,  $\xi \leq 0$ ;  $\Delta G = D \cdot t_G$  — ширина фронта;  $D$  — скорость фронта;  $t_G$  — время нарастания избыточного давления во фронте до максимального значения  $\Delta P_+$ ;  $\lambda$  — структурный параметр модели. Величина  $t_G$  определяется по формуле (1).

Варьированием параметра  $\lambda$  при заданных  $\Delta P_+$ ,  $t_G$ ,  $D$ , соответствующих их опытным среднестатистическим значениям на данном расстоянии  $R$  от центра взрыва сосредоточенного заряда взрывчатого вещества, удается найти решения  $x(t)$  уравнения (2), когда  $g(t) = \Delta P(t)$ , удовлетворительно согласующееся с зарегистрированными сигналами. При этом варьируется и коэффициент демпфирования  $k$  измерительной системы в целом. Типичные результаты иллюстрируются на рисунке 6.

В частности, на рисунке 6, а показан пример восстановления реального закона изменения во времени избыточного давления во фронтальной области взрывной волны, экспериментальная осциллограмма которой показана на рисунке 1. На рисунке 6, б показан пример восстановления сигнала во фронтальной области, зарегистрированного при взрыве 4 г ТНТ измерительной системой на основе датчика РСВ М137А23 и усилителя заряда РСВ 480С02.



**Рис. 6. Результаты восстановления фактического внешнего воздействия  $\Delta P(t)$ : — — зарегистрированный сигнал; --- — найденный закон  $\Delta P(t)$ ; — — расчетный сигнал (собственные колебания измерительной системы  $x(t)$ , соответствующие внешнему воздействию  $g(t) = \Delta P(t)$ )**

Из сказанного можно сделать вывод, что при несоответствии динамических характеристик измерительной системы амплитудно-временным характеристикам регистрируемой ВВВ погрешность измерения максимального избыточного давления во фронте волны  $\Delta P_+$  может достигать 30 ÷ 60%, а времени нарастания до максимума  $t_G$  — 75 ÷ 100%. Предлагаемый метод позволяет производить корректировку результатов измерений после проведения опытов и восстанавливать реальный закон изменения во времени избыточного давления во фронтальной области взрывных волн в воздухе. Данный результат оказывается важным для исследования

взрывных волн, формируемых при маломощных взрывах, когда изменение параметров течения во фронтальной области обладает высокой динамичностью. Наконец, из представленных в работе результатов следует, что представление о взрывном процессе как ударно-волновом далеко от реальности — фронт взрывной волны не является ударным даже на близких расстояниях от центра взрыва  $R < 50$  м.

## ЛИТЕРАТУРА

- Аверьянов М.В. (2008), Экспериментальная и численная модель распространения нелинейных акустических сигналов в турбулентной атмосфере: Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.06. Москва.
- Адушкин В. В., Христофоров Б. Д. (2004), “Исследование действия прибрежного наземного 1000-тонного взрыва на окружающую среду”, ФГВ, **40(6)**, 84–92.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. (1966), Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, Москва, Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.
- Кабыченко Н. В., Разоренов А. А., Горюнов Б.Г. (2004), “Об обеспечении ядерных полигонов приборами”, ФГВ, **40(6)**, 126–131.
- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. (1954), Механика сплошных сред, Москва, Гос. изд. тех.-теор. лит.
- Рыбнов Ю. С., Кудрявцев В. И., Ефремов В. Ф. (2004), “Экспериментальные исследования влияния приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности на амплитуду слабых воздушных ударных волн от наземных химических взрывов”, ФГВ, **40(6)**, 98–100.
- Фортов В.Е. (2002), Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока, Москва, Наука.
- Чумаков А. Н., Петренко А. М., Босак Н. А. (2003), “Особенности временной формы импульсов давления оптического пробоя воздуха”, ИФЖ, **76(4)**, 89–94.
- Broyles C.D. (1954), Dynamic Pressure Vs Time And Supporting Air Blast Measurement, Albuquerque, Sandia Corp. (Rep. WT-714).
- Evterev L.S., Kosyakov S.I. (2008), “Mechanism and Mathematical Model of the Transformation of a strong Shock Wave to a Continuous Disturbance in Air”, Journal Doklady Physics, **53(3)**, 172–174.