

# ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН ОТ ПРИПОДНЯТЫХ ЗАРЯДОВ В ВОЗДУХЕ ИЗОЛИРОВАННО ПОДВЕШЕННЫМИ ДАТЧИКАМИ\*

С. С. Басакина<sup>1</sup>, П. В. Комиссаров<sup>2</sup>, В. В. Лавров<sup>3</sup>, С. Н. Точилин<sup>4</sup>, В. Д. Гаврюшова<sup>5</sup>

**Аннотация:** Рассмотрены различные факторы, влияющие на измерение параметров воздушных ударных волн (ВУВ). Предложен новый метод регистрации параметров ВУВ от взрывов зарядов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), приподнятых над поверхностью. Показано, что использование изолированных от сейсмодвижений в грунте подвесных датчиков позволяет избежать ряда помех, искажающих результаты измерений давления различными способами. Получены вертикальные поля параметров ВУВ в плоскости симметрии для взрывов надземных сферических зарядов, наглядно демонстрирующие распространение зоны повышенных параметров вдоль поверхности, соответствующее отраженной волне сжатия. Полученные результаты позволяют увидеть распространение ВУВ в динамике и могут быть использованы как для быстрой оценки воздействия ВУВ, так и для верификации расчетных методов моделирования взрыва над поверхностью.

**Ключевые слова:** надземный взрыв; поле давления; воздушные ударные волны; тензорезистивные датчики давления

DOI: 10.30826/CE23160305

EDN: VVWMSQ

## Литература

1. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. — Изд-во Академии наук СССР, 1952. Т. 1. С. 20–110.
2. Stoner R. G., Bleakney W. The attenuation of spherical shock waves in air // J. Appl. Phys., 1948. Vol. 19. P. 670–678. doi:10.1063/1.1698189.
3. Swisdak M. M. Explosion effects and properties. Part 1. Explosion effect in air. — White Oak, TX, USA: Naval Surface Weapons Center, 1975. Report NSWC/WOL/TR-75-116.
4. Plooster M. N. Blast effects from cylindrical explosive charges: Experimental measurements. — China Lake, CA, USA: Naval Report Centre, 1982. Report NWC TP 6382.
5. Formby S. A., Wharton R. K. Blast for characteristics and TNT equivalence values some commercial explosives detonated at ground level // J. Hazard. Mater., 1996. Vol. 50. P. 183–198. doi:10.1016/0304-3894(96)01791-8.
6. Wharton R. K., Formby S. A., Merrifield R. Airblast TNT equivalence for a range of commercial blasting explosives // J. Hazard. Mater., 2000. Vol. A79. P. 31–39.
7. ARMY TM 5-1300 / NAVY NAVFAC P-397 / AIR FORCE AFR 88-22. Structures to resist the effects of accidental exposition, 1990. 1796 p.
8. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия / Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. Т. 1. 319 с. (Baker W. E., Cox P. A., Kulesz J. J. Explosion and evaluation. — 1st ed. — Elsevier Scientific Publishing Co., 1986. 807 p.)
9. Барон В. Л., Кантор В. X. Техника и технология взрывных работ в США. — М.: Недра, 1989. 376 с.
10. Рыбнов Ю. С., Кудрявцев В. И., Евменов В. Ф. Экспериментальные исследования влияния приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности на амплитуду слабых воздушных ударных волн от наземных химических взрывов // Физика горения и взрыва, 2004. Т. 40. № 6. С. 98–100.
11. Ганопольский М. И. Результаты экспериментальных исследований ударных воздушных волн при взрывах на земной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011. Т. S2-3. С. 5–37.
12. Корнилков М. В., Шеменев В. Г., Меньшиков П. В., Синицын В. А. Факторы, влияющие на интенсивность

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта РФФИ № 20-33-90202. Для получения экспериментальных данных были использованы оборудование УНУ «Сфера» и полигон ИПХФ РАН на базе Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН.

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, basakina.s@mail.ru

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, komissarov@center.chph.ras.ru

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, lavr@frcp.ac.ru

<sup>4</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, nordica06@rambler.ru

<sup>5</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, varvarahate@gmail.com

- ударной воздушной волны при изменяющихся метеорологических условиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2013. Т. 7. С. 65–71.
13. Чан Куанг Хиеу, Белин В. А. Анализ результатов натурных измерений параметров воздушных и сейсмических волн при проведении буровзрывных работ на угольных разрезах «НУИБЕО» во Вьетнаме // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2013. Т. 8. С. 284–291.
  14. Точилин С. Н., Комиссаров П. В., Басакина С. С. Оценка погрешностей определения тротилового эквивалента воздушных взрывов // Хим. физика, 2020. Т. 39. № 8. С. 35–39.
  15. Андреев С. Г., Бабкин А. В., Баум Ф. А. и др. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. — 3-е изд. — М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 832 с.
  16. Yankelevsky D. Z., Karinski Y. S., Feldgun V. R. Re-examination of the shock wave's peak pressure attenuation in soils // Int. J. Impact Eng., 2011. Vol. 38. No. 11. P. 864–881.
  17. Сумской С. И., Софьин А. С., Зайнетдинов С. Х., Агапов А. А. Параметры воздушных ударных волн цилиндрической симметрии // Хим. физика, 2020. Т. 39. № 8. С. 28–34.
  18. Цикулин М. А. Воздушная ударная волна при взрыве цилиндрического заряда большого удлинения // ПМТФ, 1960. Т. 3. С. 188–193.
  19. Johnson C., Mulligan Ph., Williams K., et al. Effect of explosive charge geometry on shock wave propagation // AIP Conf. Proc., 2018. Vol. 1979. P. 150021-1–150021-6. doi: 10.1063/1.5044977.
  20. Esparza E. D. Blast measurements and equivalency for spherical charges at small scaled distances // Int. J. Impact Eng., 1986. Vol. 4. No. 1. P. 23–40. doi: 10.1016/0734-743X(86)90025-4.
  21. Пинаев А. В., Кузавов В. Т., Кедринский В. К. Структура ударных волн в ближней зоне при взрыве пространственных зарядов в воздухе // ПМТФ, 2000. Т. 41. № 5. С. 81–91.
  22. Белов С. И., Вирченко В. А., Кравцов В. Д., Лантев В. И. Влияние высоты подрыва заряда ВВ на повышение фугасного действия на поверхности земли во внешней зоне взрыва // Вопросы оборонной техники, 2013. Т. 1-2.
  23. Knock C., Davies N. Blast waves from cylindrical charges // Shock Waves, 2013. Vol. 23. P. 337–343. doi: 10.1007/s00193-013-0438-7.
  24. Knock C., Davies N., Reeves T. Predicting blast waves from the axial direction of a cylindrical charge // Propell. Explos. Pyrot., 2014. Vol. 40. No. 2. P. 169–179. doi: 10.1002/prep.201300188.
  25. Chen Yuan, Xu Sen, Wu De Jun, Liu Da Bin. Experimental study of the explosion of aluminized explosives in air // Cent. Eur. J. Energ. Mat., 2016. Vol. 13. No. 1. P. 117–134. doi: 10.22211/cejem/64967. С. 14–18.
  26. Sochet I. Blast wave experiments of high explosives. — 1st ed. — Cham, Switzerland, 2018. 199 p. doi:10.1007/978-3-319-70831-7-7.
  27. Li Tao, Wang Cheng, Yang Tonghui, et al. A novel construction method of computational domains on large-scale near-ground explosion problems // J. Comput. Phys., 2020. Vol. 407. P. 109226. doi: 10.1016/j.jcp.2019.109226.
  28. Lukić S. Statistical analysis of blast wave decay coefficient and maximum pressure based on experimental results // WIT Transactions Built Environment, 2020. Vol. 198. P. 65–78. doi: 10.2495/SUSI200061.
  29. Langran-Wheeler Ch., Rigby S. E., Clarke S. D., et al. Near-field spatial and temporal blast pressure distributions from non-spherical charges: Horizontally-aligned cylinders // Int. J. Protective Structures, 2021. Vol. 12. No. 4. P. 492–516. doi: 10.1177/204141962110134.
  30. Wang Yong-xu, Liu Yi, Xu Qi-ming, et al. Effect of metal powders on explosion of fuel-air explosives with delayed secondary igniters // Defence Technology, 2021. Vol. 17. Iss. 3. P. 785–791. doi: 10.1016/j.dt.2020.05.010.
  31. Williams, K., Langenderfer M. J., Olbricht G., Johnson C. E. Blast wave shaping by altering cross-sectional shape // Propell. Explos. Pyrot., 2021. Vol. 46. Iss. 6. P. 926–934.
  32. Donato G., Belongie S. J. Approximate thin plate spline mappings // Computer vision / Eds. A. Heyden, G. Sparr, M. Nielsen, P. Johansen. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin–Heidelberg: Springer, 2001. Vol. 2352. P. 21–31. doi: 10.1007/3-540-47977-5\_2.

Поступила в редакцию 14.02.2023