

УДК 620.178.7

Применение многофазных структур для подавления аэрозольного выброса при взрывах

Н. П. Хохлов, А. К. Жиёмбетов,
А. Л. Михайлов, А. А. Дружинин,
А. И. Харченко, В. М. Герасимов,
Е. А. Гончаров

Приводятся результаты исследования эффективности подавления аэрозольного выброса диспергированного материала различными поглощающими многофазными структурами при взрыве. Эксперименты проводились с испытательным устройством, моделирующим аварийный подрыв боеприпаса и содержащим внутри слоя ВВ сферический лайнер из церия. Иницирование осуществлялось в одной точке внешней поверхности слоя ВВ. Из результатов экспериментов следует, что наиболее эффективным подавляющим материалом является противопожарная пена.

Для проведения взрывных испытаний экспериментальных устройств используются специализированные экспериментальные площадки, на открытой поверхности которых и производится подрыв. При этом происходит выброс в атмосферу и перенос воздушными потоками на значительные расстояния диспергированных частиц материалов, используемых в них. Наличие в экспериментальных взрывных устройствах вредных веществ (например, свинца, бериллия и т. п.), которые при испытаниях фрагментируются на частицы широкого спектрального состава по размерам, вплоть до респирабельных (с аэродинамическим диаметром $D_A \leq 10$ мкм), может создать угрозу здоровью населения. Отметим, что именно респирабельная фракция диспергированного материала представляет наибольшую опасность для человека, так как только она может проникать в альвеолы легких и накапливаться там. Более крупные частицы, оседая в бронхиальной части легких, выводятся путем откашливания и т. п., а попадая в желудочно-кишечный тракт, выводятся естественным путем.

Другим направлением взрывных работ, относящихся к проблеме прогнозирования последствий гипотетических аварий с оружием и сопровождающихся выбросом аэрозолей в атмосферу, являются опыты [1], моделирующие аварийный подрыв боеприпаса, содержащего токсичные материалы. Прямые эксперименты с выбросом токсичных веществ в атмосферу в настоящее время практически невозможны из-за резко отрицательной реакции общественности, даже если будут приняты все необходимые меры по обеспечению экологической безопасности и доказана их эффективность. Поэтому отмеченные выше направления исследований проводятся, как правило, на материалах-имитаторах.

Вопросам экологической безопасности при проведении взрывных работ всегда уделялось повышенное внимание, и в последнее время проблема локализации взрывов (полной или частичной) успешно решается. Радикальным способом подавления выбросов вредных веществ в окружающую среду является проведение испытаний экспериментальных устройств в герметичных локализирующих камерах. В настоящее время уже существуют камеры, выдерживающие взрыв

100 кг ВВ и более [2]. Однако испытания в камерах заметно сужают набор измерительных методик по сравнению с опытами на открытых площадках. К сожалению, из-за наличия вредных веществ в камере после опыта дополнительно возникают проблемы либо дезактивации, либо последующей утилизации отработанных локализирующих камер. Таким образом, локализирующие взрыв камеры и контейнеры в первую очередь предназначены для хранения и транспортировки боеприпасов, хотя в настоящее время такие одноразовые камеры нашли применение в единичных гидродинамических опытах с токсичными материалами под землей.

Работы по проблеме локализации действия взрыва не ограничиваются разработкой и использованием герметичных камер. В настоящее время разработан и используется целый ряд способов, позволяющих ослабить действие взрыва для условий горных выработок и шахт. Наиболее отработанным является применение воздушно-водяных завес (ВВЗ), образующихся, например, при взрывном распылении воды в пластичных резервуарах, подвешенных или уложенных на грунте [3]. Кроме того, отработывались и другие средства снижения разрушающего действия взрыва, включая подавление выхода аэрозолей, при использовании пассивно-механических (песок, вода, глицерин и т. п. [4]) или многофазных сред (пожарная пена [5, 6]).

Так, в работах [7–11] описаны результаты взрывных опытов в пене, приводятся данные по измерению амплитуды давления при проведении этих экспериментов по сравнению с аналогичными взрывами в воздухе. Показано, что основным фактором, определяющим снижение фугасного действия взрыва, является соотношение массы поглощающей среды и массы ВВ.

В ряде работ [12, 13] описаны исследования по подавлению выхода в атмосферу аэрозольных продуктов взрыва (АПВ) пожарной пеной. С этой целью внутрь заряда ВВ помещалось трасерное вещество: порошок каменного угля, смоченный водой до пастообразного состояния, в случае [12] и сферический лайнер из обедненного урана в случае [13]. В опытах с макетами [13] отмечено существенно большее выпадение АПВ на рубеже 5–65 м от центра взрыва в опытах с пеной, чем в аналогичных открытых опытах. Этот факт указывает на то, что часть АПВ сорбируется пеной и выпадает на ближних рубежах, а не уносится облаком взрыва. Аналогичная ситуация, но в меньшей степени, отмечена в работе [13] при проведении опыта с закладкой заряда ящиками с песком. Эти эксперименты дают некоторые сведения об эффективности подавления АПВ используемых поглощающих сред в опытах с макетами. Однако до настоящего времени нет прямых данных о степени подавления респиральной фракции аэрозолей диспергированного материала поглощающими средами во взрывных экспериментах.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования эффективности подавления аэрозольного выброса диспергированного материала при взрыве различными поглощающими многофазными структурами. Эксперименты проводились с испытательным устройством, моделирующим аварийный подрыв боеприпаса и содержащим внутри слоя ВВ сферический лайнер из церия. Иницирование осуществлялось в одной точке внешней поверхности слоя ВВ. Диаметр лайнера составлял 130 мм при толщине 6 мм. Масса ВВ в тротиловом эквиваленте составляла 10 кг, масса лайнера – 1,9 кг. В качестве материалов поглощающих сред, являющихся многофазными структурами, которыми без зазоров окружалось испытательное устройство, использованы пожарная пена и алюмосиликатные полые микросферы типа «Полигран-2» с характерным диаметром $\cong 100$ мкм, толщиной стенки $\cong 4$ мкм и насыпной плотностью $0,34$ г/см³ [14].

Предварительно перед испытаниями с поглощающими средами проведены опыты с аналогичным открытым испытательным устройством, целью которых было определение полного спектра диспергированных частиц лайнера из церия для последующего сравнения полученных результатов в опытах с поглощающими средами. В этой первой серии опытов применялось рентгенографирование процесса разлета и фрагментации лайнера на начальной стадии, использовались улавливающие устройства и мишени (рис. 1). Для регистрации спектра и массовой доли диспергированного материала, включая респиральную фракцию, применялись пятикаскадные импак-

торы ИК5-20 совместной разработки ВНИИНМ (г. Москва) и ВНИИЭФ, внешний вид которых представлен на рис. 2.

Импактор позволяет разделить попадающие внутрь частицы, благодаря принудительному прокачиванию через него воздуха, на пять фракций в зависимости от их аэродинамического диаметра за счет эффекта инерционного осаждения на специальных подложках-фильтрах (с учетом конечного фильтра разделение производится на 6 фракций). Импакторы предварительно калибровались, и диапазон регистрируемого спектра частиц составлял от $50 \text{ мкм} > D_A > 18 \text{ мкм}$ (первый каскад) до $D_A \leq 1 \text{ мкм}$ (последний каскад). Измерение массы церия, осевшего на подложках импакторов, проводились нейтроноактивационным методом [15], а в отдельных случаях использовался спектрофотометрический метод [16].



Рис. 1. Место проведения опыта



Рис. 2. Импактор ИК5-20

В каждом опыте было задействовано 20 импакторов, которые размещались на расположенном вертикально измерительном стенде площадью $\cong 100 \text{ м}^2$. Импакторы располагались на рубежах 2,5; 5; 7,5 и 10 м от уровня земли, а стенд находился на расстоянии 9,5 м от испытательного устройства. Большая площадь измерительного стенда обеспечивала прохождение через него значительной части облака взрыва. С целью уменьшения вовлечения грунта подстилающей поверхности в облако взрыва заряд устанавливался перед стендом на бетонной площадке размером $8 \times 8 \text{ м}$, покрытой металлическим листом размером $4 \times 4 \text{ м}$. Важным условием для регистрации импакторами аэрозольного выброса является проведение опыта при таком направлении ветра, при котором облако взрыва было бы направлено на измерительный стенд. Поэтому опыт с открытым испытательным устройством проводился в режиме ожидания благоприятных метеорологических условий.

Что касается опытов с поглощающими средами, то здесь требования к подстилающей поверхности не предъявлялись, поскольку испытательные устройства помещались на определенной высоте в деревянных каркасах, удерживающих полиэтиленовые мешки (при заполнении пеной размером $2,5 \times 2,5 \times 2,5 \text{ м}$ алюмосиликатными микросферами – $1,1 \times 1,1 \times 1,1 \text{ м}$). В зависимости от направления ветра эти каркасы можно было устанавливать относительно стенда так, чтобы облако взрыва было направлено на него. Эксперименты проводились при соотношении масс поглощающей среды и ВВ (в т. э.), равном $\cong 50$. Это обеспечило частичную локализацию аэрозольного выброса и при этом надежную регистрацию импакторной диагностикой выходящей его части.

На рис. 3 приведены кадры видеосъемки, отражающие некоторые особенности взрывных явлений с испытательными устройствами, помещенными в поглощающие среды, и взрывом открытого заряда.

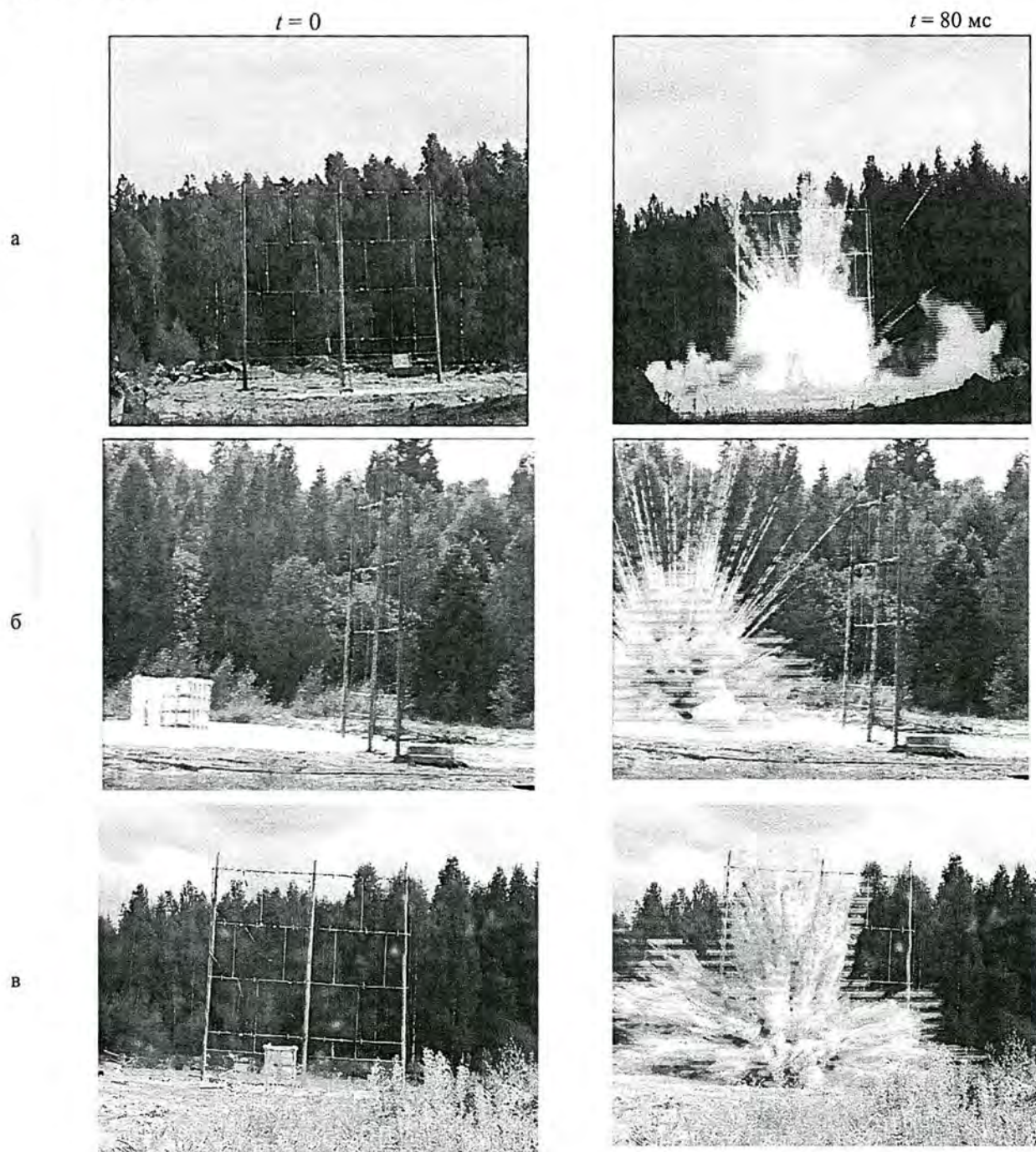


Рис. 3. Видеокадры взрывных явлений в опытах:
а – открытый заряд; б – заряд в пожарной пене; в – заряд засыпан микросферами

Из всего объема полученной информации в этих экспериментах выделим лишь результаты, зарегистрированные импакторной диагностикой, позволяющие оценить массовую долю выброса в облако взрыва аэрозолей церия, включая респирабельную фракцию, и, в конечном итоге, определить эффективность подавляющей способности применяемых поглощающих сред. Для оценки спектров аэрозолей, содержащих церий, было проведено усреднение массовой доли церия на каскадах импакторов в каждом из опытов. Средняя массовая доля церия на k -м каскаде вычислялась

по формуле $\bar{\delta}_k = \sum_{i=1}^{N_I} \delta_{ik} \frac{M_i}{M}$, где N_I – число импакторов в опыте; δ_{ik} – массовая доля церия на k -м каскаде i -го импактора; M_i – суммарная масса церия, зарегистрированная в i -м импакторе; M – полная масса церия, определенная во всех импакторах в опыте. Результаты обработки импакторных измерений представлены на рис. 4.

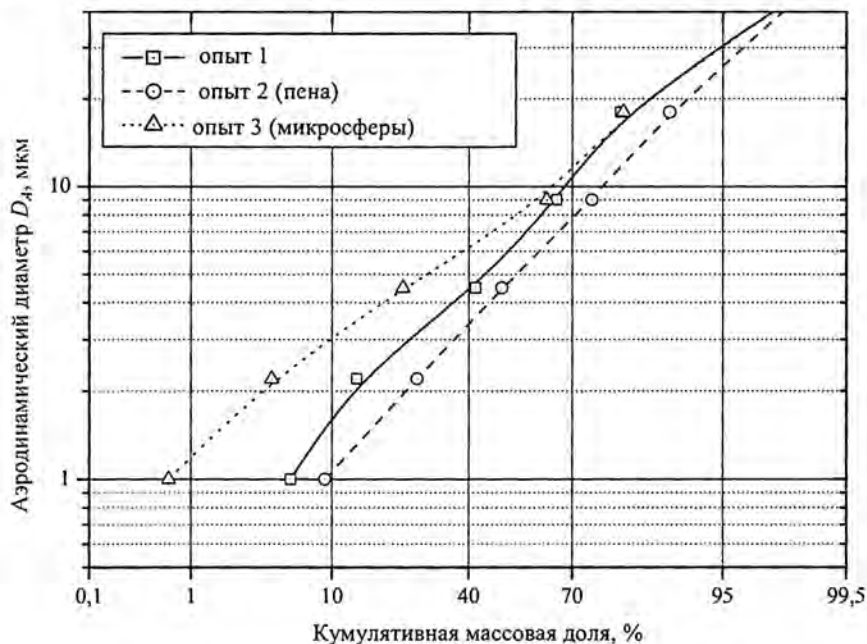


Рис. 4. Спектры аэрозолей, содержащих церий, в опытах

В опыте 2 с пеной спектр частиц содержит большую долю мелких частиц с аэродинамическим диаметром $< 4,5$ мкм. Это произошло потому, что заметная часть более крупных частиц захватывается веществом пены, выпадая в ближней зоне.

В опыте с микросферами, наоборот, в измеренном спектре очень мало мелких аэрозолей с аэродинамическим диаметром $< 2,2$ мкм. Это указывает на хорошие адсорбционные свойства микросфер по отношению к частицам такого размера, находящимся в основном в жидком состоянии.

На основании результатов импакторных измерений в опытах 1–3 проведена оценка доли церия в облаке взрыва от его количества, содержащегося в лайнере. Массовые доли спектра частиц, измеряемого импакторами, оценим по формуле

$$\Delta = M_{\text{имп}} V_{\text{обл}} / (M_{\text{лайн}} V_{\text{имп}}),$$

где $M_{\text{имп}}$ – обнаруженная в импакторах масса церия, $M_{\text{лайн}}$ – начальная масса церия в лайнере (1,9 кг); $V_{\text{обл}}$ – объем облака взрыва; $V_{\text{имп}}$ – объем воздуха, прокачанный через импакторы за время

прохождения облака взрыва через измерительный стенд. Для респирабельной фракции в этой формуле под $M_{имп}$ будет подразумеваться масса церия в импакторах в респирабельной фракции.

В таблице приведены результаты оценки массовой доли церия в облаке взрыва от его количества, заложенного в испытательное устройство: Δ – массовая доля церия в полном спектре, зарегистрированном импакторами ($D_A \leq 50$ мкм); $\Delta_{респ}$ – массовая доля церия в респирабельной части спектра.

Результаты оценки массовой доли церия в облаке взрыва от его количества, заложенного в испытательное устройство

	Опыт 1	Опыт 2, пена	Опыт 3, микросферы
$\Delta, \%$	36,9	1,6	8,5
$\Delta_{респ}, \%$	24,6	1,3	5,4

Пожалуй одним из важных выводов, который можно сделать по представленным в таблице результатам экспериментов, является то, что наибольшее примерно в 20 раз подавление выброса в атмосферу респирабельной фракции получено в опыте 2, где в качестве поглощающей среды использовалась пожарная пена в количественном соотношении $M_{пен}/M_{ВВ} = 44$. Более слабый, хотя также существенный (в $\cong 5$ раз), эффект ослабления выброса в атмосферу церия реализовался в опыте 3, где в качестве поглощающей среды использовались алюмосиликатные микросферы в количественном соотношении $M_{мксф}/M_{ВВ} = 50$.

Таким образом, в целях обеспечения экологической безопасности взрывных опытов с вредными веществами применение пожарной пены для подавления аэрозольного выброса в атмосферу является предпочтительным по сравнению с алюмосиликатными микросферами.

Список литературы

1. Хохлов Н. П., Михайлов А. Л., Смирнов Г. С., Хелемендик А. М., Жиёмбетов А. К., Петрова С. А. Фрагментация и диспергирование материалов при аварийном взрыве // Материалы II сессии школы-семинара «Экологическая и промышленная безопасность». Саров. 2003. С. 94–103.
2. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под общ. редакцией проф. Иванова А. Г. Саров. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
3. Бузуков А. А., Сваровский Б. М., Щекотихин Б. М. Защита от воздушных ударных волн в подземных выработках с помощью воздушно-водяной завесы // Сб. науч. трудов под ред. Н. Г. Дубинина. Сиб. отделение АН СССР. Институт горного дела. Новосибирск. 1970. С. 176–185.
4. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В., Михайлин А. И., Орлов А. В. Ослабление воздушных взрывных волн при взрыве зарядов взрывчатого вещества в объеме жидкости, ограниченном эластичной оболочкой // ФГВ. 2001. Т. 37, № 5. С. 128–133.
5. Обер Д. Г., Крейник Э. М., Рэнд П. Б. Водные пены // В мире науки. 1986, № 7. С. 36–45.
6. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975.

7. Кудинов В. М., Паламарчук Б. И., Гельфанд Б. Е., Губин С. А. Параметры ударных волн при взрыве зарядов в пене // ДАН СССР. 1976. Т. 228. С. 555–557.
8. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И. Особенности распространения ударных волн в пенах // ФГВ. 1981. Т. 17, № 4. С. 129–136.
9. Альтшулер Л. В., Кругликов Б. С. Затухание сильных ударных волн в двухфазных и гетерогенных средах // ПМТФ. 1984, № 5. С. 24–29.
10. Вахненко В. А., Кудинов В. М., Паламарчук Б. М. К вопросу о затухании сильных ударных волн в релаксирующих средах // ФГВ. 1984, Т. 20, № 1. С. 105–111.
11. Новиков С. А. Полезные взрывы. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000.
12. Авраменко М. И., Гвоздик М. Ю., Крыжановский В. В., Ульянов С. М. Проблемы подавления взрывного аэрозольного выброса // Материалы российско-американского семинара «Безопасность и сохранность при демонтаже WSSX». Снежинск. 19–23 апреля 2004. С. 1–4.
13. Mikhailov A. L., Khizhnyakov V. V. Review of experimental data on formation of aerosol pollution source at explosions // Report of VNIIEF-SNL. Contract AV-7964. Task 2. 1998.
14. Данилин Л. Д., Дрожжин В. С., Куваев М. Д. и др. Полые микросферы из зол уноса электростанций // Тез. докл. II Междунар. научно-практической конференции «Экология в энергетике – 2005». Москва. 2005. С. 113–114.
15. Ядерно-физические константы для нейтронного активационного анализа. М.: Атомиздат, 1969.
16. Сендл А. Калориметрические методы анализа. М.: ИЛ, 1971.

Application of Multiphase Structures to Inhibit Explosive Aerosol Release

N. P. Khokhlov, A. K. Zhiembetov, A. L. Mikhailov, A. A. Druzhinin,
A. I. Kharchenko, V. M. Gerasimov, E. A. Goncharov

The paper presents the results of the experiments aimed at revealing the effectiveness of optional absorbing multiphase structures as they inhibit explosive aerosol release. The experiments involved the facility, imitating accidental explosion of demolition munition, containing HE layer with spherical cerium liner inside. Explosion was initiated in one point of the exterior surface of HE layer. Experimental results testified, that anti-fire foam proved to be the most effective inhibiting material in the above specific environment.