

ИМПУЛЬСНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ПРИ СИЛЬНОМ РАСШИРЕНИИ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ТВЕРДЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ (ОБЗОР)

Э. Э. Лин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Рассмотрены особенности импульсного нагружения объектов, создаваемого при сильном расширении продуктов взрыва твердых взрывчатых веществ. Приведены параметры полуэмпирического уравнения состояния продуктов взрыва в ранее мало изученной области плотности. Обобщены результаты экспериментальных исследований отражения нестационарных ударных волн от жесткой стенки и их воздействия на тонкие преграды. Описаны процессы, протекающие при умеренных по интенсивности динамических воздействиях на сплошные и пористые среды: множественное соударение твердых тел с твердыми преградами; ударно индуцированная коалесценция наноалмазов; излучательные эффекты при расширении продуктов взрыва в вакуумированный объем, в воздух и в инертный газ.

Ключевые слова: продукты взрыва, сильное расширение, импульсное нагружение.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение твердых взрывчатых веществ (ВВ) в физическом эксперименте обусловлено возможностью значительной — на несколько порядков — вариации параметров импульсного нагружения объектов в зависимости от геометрии задачи и начального состояния исследуемой системы [1, 2]. Наиболее высокие динамические давления p с длительностью действия $\tau \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ с соответствуют состоянию продуктов взрыва (ПВ) вблизи фронта детонации и в волне Тейлора. Этим обусловлено преимущественное изучение термодинамических свойств ПВ при высоких плотностях: $\rho \approx 10^3 \div 10^2$ кг/м³, т. е. в области вблизи точки Жуге и при малой степени расширения ПВ $V/V_H \approx 10$ ($V = 1/\rho$ — текущий удельный объем, V_H — удельный объем в точке Жуге). Вместе с тем стадия дальнейшего расширения продуктов взрыва представляет интерес как с точки зрения изучения их термодинамических свойств, так и в плане создания умеренных динамических давлений с длительностью действия $\tau > 10^{-5}$ с. Характерными процессами в задачах такого рода являются перекачка потенциальной энергии ПВ в кинетическую по мере их расширения, формирование нестационарных течений и ударных волн (УВ) в различных средах, импульсное воздействие УВ и метаемых твердых тел на преграды. Исследования этих процессов связаны с развитием ме-

тодов обработки материалов взрывом, а также с лабораторным моделированием действия различных факторов взрыва на объекты окружающей среды (см. [2–4]).

В известной мере перечисленные выше процессы изучены достаточно подробно (см., например, [2]). Однако можно выделить ряд специфических вопросов, которые требуют более тщательного рассмотрения. В первую очередь, это касается однозначного определения термодинамических параметров ПВ при их сильном расширении, когда $V/V_H \approx 10^2 \div 10^3$. Характер и параметры создаваемых импульсных нагрузок связаны со спецификой той или иной прикладной задачи. Например, при отражении нестационарной УВ от твердой преграды профиль давления во времени связан с геометрией заряда ВВ и с расстоянием от заряда до преграды. При взрыве удаленного сосредоточенного заряда спад давления во времени на начальной стадии отражения УВ происходит более круто, чем при взрыве протяженного заряда, расположенного вблизи преграды. Корректное определение зависимости амплитуды и длительности импульса давления от начальных условий эксперимента позволяет исследовать отклик нагружаемых объектов в широком диапазоне изменения параметров воздействия. Вполне определенный интерес представляет также задача коллективного направленного разгона твердых тел расширяющимися ПВ. Отсюда возникает проблема «низкоскоростно-

го» множественного удара. Кроме того, можно выделить проблему «мягкого» динамического нагружения пористых сред из нанометричных частиц, не приводящего к глобальным фазовым превращениям в наноструктурированных образцах.

Выбор перечисленных примеров связан с расширением диапазона исследований [2–4] механической стойкости материалов и конструкций, а также с развитием динамических методов получения сверхтвердых материалов, в частности «взрывных» алмазов [2, 5]. Задачи исследований, рассматриваемых в данном обзоре, формулируются в § 1 с обозначением их новизны. В § 2–4 изложены результаты их решения. Полученные результаты и перспективы дальнейших исследований обсуждаются в § 5. Там же описываются излучательные процессы, наблюдаемые при сильном расширении ПВ в вакуумированный объем, в воздух и в инертный газ — ксенон.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Характер взаимодействия расширяющихся продуктов взрыва с различными средами связан с термодинамическим состоянием ПВ, которое определяется из полуэмпирических уравнений состояния (см., например, [2, 6–9]). Эти уравнения позволяют определить давление ПВ в зависимости от плотности при заданном показателе политропы k (или коэффициенте Грюнайзена γ). Эффективный показатель политропы k изменяется с плотностью, уменьшаясь от значения $k \approx 3$ в точке Жуге, где велика роль упругих сил взаимодействия частиц ПВ, до $k \approx 1$ в области параметров, где взаимодействие частиц разреженных ПВ носит в основном тепловой характер. На стадии сильного расширения ПВ, соответствующей отсутствию упругих сил («идеальному» газу), показатель политропы обычно определяется либо априори, либо расчетным путем и для различных бризантных ВВ находится в диапазоне $k_0 = 1,14 \div 1,375$, при этом он может различаться для одного и того же ВВ в зависимости от выбранного вида уравнений состояния [2, 8]. Вместе с тем в ряде задач точное знание этого параметра оказывается принципиально важным, так как он определяет уровень остаточных давлений в области взрыва. Для индивидуальных ВВ, состав ПВ которых известен, значение k_0 можно найти путем вычислений теплотемкостей отдельных компонентов. Для сме-

совых ВВ, в частности для ВВ с различного рода добавками, такой подход представляется затруднительным из-за сложности состава ПВ и протекающих в них релаксационных процессов. Отсюда возникает необходимость прямого экспериментального определения k_0 на стадии сильного расширения ПВ, когда упругие силы взаимодействия молекул практически отсутствуют.

Лабораторное моделирование действия сильного атмосферного взрыва на различные объекты, как правило, осуществляется с помощью взрыва сферического заряда ВВ [2, 10–12]. Удобным инструментом для моделирования является также взрывная ударная труба с плоским зарядом ВВ [13–16]. Наибольшее внимание уделено исследованиям течения в УВ в ближней зоне взрыва на расстояниях $x \leq 200\Delta$ (Δ — толщина заряда) и на предельной квазиакустической стадии процесса. Промежуточная стадия распространения плоской взрывной УВ в воздухе изучалась в основном теоретически [17]. Поэтому представляет интерес экспериментально изучить особенности течения в умеренной УВ в диапазоне $x/\Delta = 200 \div 2000$. При этом целесообразно рассматривать режим отражения нестационарной УВ от твердой преграды, так как при этом достигаются наиболее высокие уровни нагрузок. Характер отражения падающей УВ связан с ее интенсивностью, которая зависит от пройденного фронтом УВ расстояния x от заряда ВВ, т. е. от степени расширения ПВ. Целесообразно также изменять вид зависимости давления от времени, что может быть достигнуто путем выделения энергии взрыва в протяженной области пространства с помощью объемно-распределенного заряда ВВ.

Механическое действие нестационарной УВ на элементы конструкций можно рассмотреть на примере импульсного деформирования пластин. Эта задача изучалась в работах [18–22] как теоретически, так и экспериментально. В экспериментах однозначно устанавливается связь интегральных характеристик деформирования — остаточного прогиба пластины и деформации срединной поверхности — с параметрами нагружения, в частности с удельным импульсом давления, распределенного либо по всей поверхности пластины, либо по части ее (локальное нагружение). В расчетном плане задача обычно рассматривается в рамках модели [19] жесткопластического тела, позволяющей

определить деформации растяжения срединной поверхности пластины, т. е. учесть влияние мембранных сил при больших прогибах. Однако в упомянутых работах значения удельного импульса давления, диаметра области нагружения, диаметра и толщины пластины варьировались в узких пределах, что затрудняет получение обобщенных зависимостей остаточных прогибов и разрушающих деформаций пластин от характеристик воздействия.

Исследованиям высокоскоростного метания и удара твердых тел при взрывах зарядов твердых ВВ посвящено большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ. Результаты этих исследований проанализированы и обобщены в [2, 23–25]. В подавляющем большинстве задач рассматривается одиночное воздействие ударника с начальной массой $m_0 \approx 1 \div 10$ г на различные материалы при начальной скорости соударения $U_0 \approx 1 \div 10$ км/с. Рассматриваются различные механизмы соударения и проникания тел в материал преграды, приводящие к образованию и распространению трещин. Достигнутые результаты, в целом, позволяют прогнозировать поведение различных материалов при высокоскоростном одиночном ударе.

Исследование коллективного воздействия твердых тел на преграды представляет интерес для разработки средств защиты элементов конструкций от осколочного действия взрыва [26, 27] и от воздействия потоков техногенного космического мусора при догонных столкновениях [28, 29], а также в плане установления на «макроскопическом» уровне эффективности механизмов [30–33] проникания потоков микрочастиц в конденсированные среды. В свете этого можно условно выделить два типа задач, связанных с воздействием потоков твердых тел на твердые преграды при скоростях соударения $U_0 = 1 \div 5$ км/с: 1) взаимодействие преграды с множеством ($\approx 10^8 \div 10^{12}$) микрочастиц размерами $d_0 = 10^{-6} \div 10^{-4}$ м; 2) взаимодействие с преградой нескольких тел с характерными размерами $d_0 = 1 \div 10$ мм. В обоих типах задач определяющим является высокоскоростное деформирование материала. Это позволяет рассчитывать на выявление общих черт в процессах множественного ударного воздействия микрочастиц и макрочастиц на преграды. В [34] на основе неравенств, связывающих начальную скорость частицы, ее размер и критическую скорость деформации, при превыше-

нии которой происходят сдвиговое упрочнение и отрывное охрупчивание материала, высказано предположение о возможности повышения эффективности проникания в материалы частиц достаточно больших размеров.

В отмеченных выше работах для анализа основных механизмов взаимодействия потока твердых частиц с материалом преграды используются хрупкие, пластические и откольные модели. В хрупких моделях материал преграды рассматривается как упругохрупкая среда. Пластические модели связаны с образованием сдвиговых напряжений в материалах ударников и преграды в области контакта. Взаимодействие волн напряжений, создаваемых соседними ударниками, приводит к возникновению значительных деформаций сдвига и к частичной, а также к локально полной потере прочности среды преграды. В откольных моделях рассматривается, в частности, возникновение в преграде продольных каналов нарушения сплошности в результате интерференции (фокусировки) волн разгрузки, источником которых являются боковые грани частицы, тыльная поверхность соседних частиц, а также поверхности преграды, на которых возникают краевые эффекты. В данном случае речь идет о «внутреннем» продольном отколе, а не об отколе на тыльной поверхности преграды, связанном с упомянутыми краевыми эффектами. Локализованные области потери прочности и полые каналы (трещины), по-видимому, зарождаются в результате накопления повреждений на мезоскопическом и микроскопическом уровнях. Совместное действие пластических и откольных механизмов повышает эффективность множественного соударения твердых частиц с преградами. Общей чертой упомянутых механизмов является отсутствие строгого ограничения на размер частиц-ударников.

Коллективный характер процесса взаимодействия преграды с потоком твердых макроскопических тел наиболее отчетливо может проявляться в условиях, при которых одиночное воздействие оказывается слабым. Таким условиям соответствуют «малые» скорости соударения, значительно меньшие критической скорости удара U_* , выше которой прочностные свойства материала преграды мало влияют на характер взаимодействия с ударником. С другой стороны, начальная скорость соударения U_0 должна быть не меньше пороговой скорости U_{sol} [17, 25], соответствующей началу