

Проявления неустойчивости при схлопывании металлических облицовок кумулятивных зарядов и в родственных струйных течениях динамически деформируемых профилированных тел

© А.В. Бабкин, А.С. Новосельцев, С.В. Ладов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлен краткий анализ ряда опубликованных работ, посвященных исследованию особенностей кумулятивного взрыва в условиях возможного развития поверхностной неустойчивости схлопывающейся облицовки кумулятивного заряда. В большинстве работ поверхностная неустойчивость изначально инициировалась гармоническими поверхностными возмущениями или возмущениями параметров задаваемой нагрузки, имитирующей взрывную. Неустойчивость проявлялась в форме развития с течением времени поверхностных возмущений, отсутствие или ограниченный рост рассматривались как сохранение устойчивости деформируемой оболочки. Помимо влияния неустойчивости на кумулятивные процессы были исследованы и родственные им струйные течения. Это так называемое взрывное диспергирование (пыление), происходящее как под воздействием интерференции ударных волн и волн разгрузки, так и при наличии начальных возмущений формы поверхности. Анализ исследований построен в рамках феноменологического подхода — рассматривались как основные результаты опытов, так и их математические описания, которые в большинстве случаев выполнялись с позиций, установившихся в механике сплошных сред, а также с помощью численного моделирования. По результатам были сформулированы выводы о причинах и формах проявления поверхностной неустойчивости схлопывающихся металлических облицовок кумулятивных зарядов, характере развития и параметрах процесса функционирования таких зарядов, а также об особенностях и закономерностях данного процесса.

Ключевые слова: кумуляция, кумулятивный заряд, облицовка, схлопывание, струйное течение, динамическое деформирование, поверхностные возмущения, неустойчивость

Введение. В настоящей статье представлены и проанализированы различные исследования по устойчивости металлических облицовок кумулятивных зарядов (КЗ) и других оболочек при их схлопывании, а также сопутствующих струйных течений профилированных тел при их динамическом деформировании.

Рассмотренные работы [1–30] условно можно разделить на три группы, взяв за предметную основу:

1) работы непосредственно по схлопыванию металлических оболочек (в том числе, металлических облицовок КЗ) под действием взрывного нагружения, учитывая при этом возможную неустойчивость процесса;

2) работы по исследованию развития поверхностных возмущений и струйных течений, отдельных или групповых, возникающих под действием ударной волны;

3) работы по взрывному диспергированию (или «взрывному пылению») металлов и элементов конструкций под действием ударных волн.

У этих трех групп просматривается общий признак: все они предметно заострены на проблематике создания устройств, предназначенных для всестороннего сжатия материалов при сверхвысоких давлениях. Однако работы группы 1 к тому же имеют и самостоятельное значение, так как относятся к традиционной «механической» кумуляции, прежде всего, к ее технологическим аспектам.

Среди приведенных здесь работ [1–30] выделялись использованные авторами методы решения — экспериментальные и расчетно-теоретические. Особое внимание уделялось полученным результатам: физике развития поверхностных возмущений, определяющим параметрам процесса и обобщенным соотношениям, характеризующим процесс развития неустойчивости. Основная цель работы заключалась в оценке текущего состояния этих вопросов.

Неустойчивость при схлопывании металлических оболочек под действием взрыва. По-видимому, первой работой, в которой рассматривались эффекты неустойчивости деформирования металлических оболочек, схлопывающихся под действием взрывной нагрузки, была [1] с численным решением этой задачи. В ней рассматривалось течение имплозивного типа при движении сферической оболочки к центру симметрии. Авторами предполагалось, что форма оболочки может отклоняться от сферической как в начале, так и в процессе схлопывания. На наружной или на внутренней поверхности оболочки задавались начальные гармонические поверхностные возмущения. Изучалось поведение возмущений по мере схлопывания оболочки — их развитие или подавление с течением времени. Одним из выводов, полученных в результате исследования [1], стал следующий: малопрочные сферические оболочки становятся более чувствительными к несовершенству своей формы, чем высокопрочные, а их схлопывание сопровождается более значительным проявлением неустойчивости на внутренней и на внешней поверхности.

В работах [2–4] предполагалось, что процесс развития неустойчивости при схлопывании оболочки связан с технологическими погрешностями при изготовлении кумулятивных облицовок, например их разностенностью, или с несовершенством прилагаемой взрывной нагрузки. Основной целью этого исследования был поиск ограничений в работе КЗ с предварительным тепловым воздействием на его облицовку [5, 6]. Ожидалось, что чрезмерное развитие неустойчивости на поверхности схлопывающейся облицовки может воспрепят-

ствовать последующему нормальному образованию кумулятивной струи.

Схлопывание облицовки исследовалось в рамках численного решения двумерной плоской нестационарной задачи с задаваемыми гармоническими возмущениями формы внутренней или внешней поверхности при наличии воздействия давления на ее наружную поверхность. Рассматривалось динамическое деформирование фрагмента оболочки, угол раствора которого соответствовал половине длины волны задаваемого гармонического возмущения. На тангенциальных поверхностях фрагмента принимались граничные условия симметрии в тангенциальном направлении, чтобы учитывалось деформирование фрагмента в составе оболочки.

Первичный параметрический анализ процесса, проведенный в [2, 3], показал влияние на развитие неустойчивости длины волны и амплитуды начальных поверхностных возмущений, места возникновения возмущений (наружная или внутренняя поверхность) и показателя динамической прочности материала оболочки — динамического предела текучести Y_0 . При этом сначала были выявлены особенности механизма неустойчивости и показано, как начальные малые возмущения формы наружной поверхности в процессе динамического деформирования оболочки могут очень сильно, а в ряде случаев даже тысячекратно, изменять ее форму. Подтверждено существенное влияние на амплитуду возмущений динамической прочности материала Y_0 . Однако, в отличие от работы [1], значительное искажение формы оболочки проявляется лишь на наружной поверхности, тогда как внутренняя поверхность оболочки и ее струеобразующий слой деформируются устойчиво. Более того, возмущения, заданные на внутренней поверхности, стремятся к переходу на наружную поверхность. Было отмечено, что наблюдаемая в данной работе неустойчивость развивается в соответствии с закономерностями инерционной неустойчивости Релея — Тейлора [7–9]. Эффекты ударно-волновой неустойчивости Рихтмайера — Мешкова [10] были признаны не имеющими первостепенной значимости. Было сделано предположение, что причина этого — относительно небольшие давления, присущие работе КЗ.

Экспериментальные работы [7–9] последовали за «численной» работой [1], существенно развивая рассмотренные в ней вопросы неустойчивости схлопывающихся оболочек. В [7] методом импульсной рентгенографии исследованы возмущения на внутренней поверхности сходящихся многослойных тонких цилиндрических оболочек. Такие возмущения порождались многоточечным иницированием заряда, обжимающего оболочки по их наружной поверхности. Внутренняя оболочка многослойного цилиндра выбиралась из стали марки Ст3 или из свинца — для оценки влияния прочности на развитие возмущений. В работе показано, что на всем участке схлопывания

оболочек знак возмущений сохраняется, т. е. не наблюдается колебательного характера их изменения, как это следовало из ряда ранее сделанных предположений. Развитие возмущений до определенной амплитуды происходит ограниченно по времени и в пространстве — на стадии разгона оболочек продуктами взрыва. На последующей (инерционной) стадии до больших схождения и малых радиусов внутренней оболочки амплитуды возмущений сохраняются практически неизменными. Однако в случае для стали возмущения практически сливаются, образуя область пониженной плотности перед основной частью сходящейся оболочки. Для оболочки из свинца этого явления не наблюдается — сохраняется струйный характер возмущений. На малых внутренних радиусах начинается процесс взаимодействия струй между собой, в результате которого отдельные частицы достигают оси симметрии оболочек. Как следует из экспериментов, прочность материала оболочки оказывает существенное влияние не только на форму, но и на амплитуду возмущений. В частности, выяснилось, что у стальных оболочек амплитуда возмущений примерно в 1,5 раза меньше, чем у свинцовых оболочек.

Существенное влияние сдвиговой прочности на развитие неустойчивости при взрывном схлопывании и последующем торможении оболочек подтверждается экспериментальными данными работы [8]. Варьирование показателями сдвиговой прочности в этой работе проводилось в условиях, когда обжимаемая оболочка частично или полностью была заполнена более плотной средой и могли возникать условия для инерционной неустойчивости Релея — Тейлора. В случае разгона оболочки эта неустойчивость проявлялась в виде роста возмущений на наружной поверхности, тогда как возмущения на внутренней поверхности не развивались. В случае же торможения оболочки все происходило наоборот. Отмечено существование трех так называемых стадий инерционной неустойчивости: «экспоненциальная», «степенная» и «зона турбулентного перемешивания». Для оценочного использования на первой экспоненциальной стадии предложено следующее соотношение для роста амплитуды поверхностных возмущений:

$$a(t) = a_0 \exp \left[t \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} g \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{1/2} \right],$$

где $a(t)$ и a_0 — текущая и начальная амплитуда возмущений; ρ_1 и ρ_2 — плотности материала оболочки и среды; g — ускорение свободного падения; λ — длина волны возмущения.

Предложено рассматривать в качестве критериев перехода из устойчивости к неустойчивости критическую длину волны λ_* и кри-

тическую начальную амплитуду возмущений a_* с вариантами их приближенной оценки согласно следующим соотношениям:

$$\lambda \geq \lambda_* = \frac{4\pi G}{\rho g}, \quad a_0 \geq a_* = \frac{Y_0}{\rho g}, \quad a_0 \geq a_* = \frac{Y_0}{\rho g} \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_*} \right),$$

где G — модуль сдвига; Y_0 — динамический предел текучести.

Путем импульсного рентгенографирования были исследованы разлетная и подлетная стадии движения стальных и свинцовых оболочек с вкладышами из пенопласта. В целом подтверждено, что сдвиговая прочность материала оболочки по отношению к самой оболочке играет стабилизирующую роль, т. е. препятствует потере оболочкой устойчивости при деформировании ее под действием взрывного нагружения.

В исследовании [11] изучалась задача неустойчивого метания оболочки. Предполагалось, что любые дефекты облицовки с длиной волны, большей некоторого критического значения, будут приводить к неограниченному росту возмущений в процессе ее движения. Рассматриваемые начальные отклонения формы оболочки характеризовались длиной волны большей, чем толщина облицовки. Мелкомасштабные возмущения с длиной волны, гораздо меньшей толщины, в данной работе не рассматривались.

При изучении процесса неустойчивости были использованы предложенные авторами модель слабоупругой оболочки, а также инерционная модель. В первом случае характерным элементом является значение величины перепада давления, которое значительно больше предела упругости материала, но меньше модуля Юнга. Предполагалось, что на начальной стадии разгона возникает продольная упругость оболочки с модулем, пропорциональным действующему давлению, которая препятствует расширению оболочки и подобна модели трехмерной среды Треолара. Инерционная модель используется для описания движения метаемой взрывом пластины или оболочки в тех случаях, когда продольной упругостью можно пренебречь.

Результатом исследования в [11] стало появление теории движения неоднородных упругих оболочек при больших ускорениях. Сделано допущение, что существует критическая длина волны начальных возмущений, которая приводит к наибольшему росту их амплитуды, и что длина такой волны пропорциональна средней толщине облицовки на рассматриваемом участке. Были предложены конструкции экспериментальных рельефных облицовок, в которых устраняется хаотическая неустойчивость и одновременно происходит кумуляция энергии и импульса облицовки в соответствии с заданной на ней системой линий, т. е. предприняты шаги по оказанию влияния на пробивное действие облицовок с помощью неустойчивости. Еще один

вывод работы [11] связан с гладкими коническими безрельфными кумулятивными облицовками. Предполагается, что процесс неустойчивости в них приводит к диссипации энергии и уменьшению эффективности действия зарядов. Также процесс неустойчивости отрицательно сказывается на форме струи, образующейся из оболочки, — на ней образуются перетяжки [12]. Однако влияние роста возмущений несущественно для облицовок с малым углом раствора конуса.

Последними по времени выпуска работами в области кумуляции, в которых неустойчивость при схлопывании кумулятивной облицовки исследуется экспериментально, были [13–18].

В [13] научная задача потери устойчивости облицовки при ее взрывном сжатии оценена как острая, требующая в дальнейшем большего внимания, и перспективная с точки зрения управления этим процессом при образовании высокоскоростной струи. В работе использованы такие методы исследования, как импульсная рентгенография кумулятивной струи, микрошлифы сохраненных пестов, композитная кумулятивная облицовка кумулятивного заряда с визуальной контрастной парой медь — константан (различие в плотностях — 0,6 %). Все эти экспериментальные средства позволили не ограничиться результатами расчетов, а визуализировать деформационные процессы при кумулятивном течении металлов и увидеть результаты потери устойчивости конической облицовки при ее взрывном сжатии в процессе формирования кумулятивной струи, в частности, значительный рост ранее заданных малых поверхностных возмущений.

В работах [13–17] неустойчивость сходящихся оболочек экспериментально исследовалась по методике «останавливаемой оболочки», когда сообщаемая оболочке энергия взрыва, с одной стороны, достаточна для полной ее диссипации к моменту остановки, с другой — не превышает ее. Были определены макро- и микроструктурные закономерности деформационного поведения и механизмов изменения формы оболочек при их схождении в зависимости от размеров и свойств материала оболочки. В работе [13] было замечено, что в настоящее время отсутствуют общепризнанные критерии неустойчивого движения оболочек. Тем не менее по результатам экспериментов был предложен феноменологический критерий устойчивого схождения оболочки, а также сделан достаточно неожиданный вывод о невыполнении закона подобия применительно к инерционному схождению оболочек и последующей их остановке.

Поверхностные возмущения и струйные течения деформируемых тел под действием ударной волны, входящей на свободную поверхность тела. В работе [19] экспериментально и расчетно-теоретическим путем исследовались струйные течения, образующиеся при взрывном нагружении металлического образца и при последующем выходе ударной волны на его свободную поверхность, где

нанесены первоначально синусоидальные возмущения, которые были множественными и относительно длинноволновыми. Заданные возмущения развивались по мере протекания процесса. Такая неустойчивость интерпретировалась как близкая по природе к эффектам кумуляции, а точнее микрокумуляции, но, очевидно, отличалась от них характерным соотношением размеров. В дополнение к экспериментам в работе [19] было выполнено численное моделирование развития поверхностных возмущений. Использовался код ДМК в рамках двумерной нестационарной сжимаемой упругопластической постановки задачи с учетом развития поврежденности и накопления меры поврежденности вследствие сдвиговых деформаций.

В работе [20] было предпринято численное исследование неустойчивости Рихтмайера — Мешкова, инициируемой цилиндрическими ударными волнами. Рассматривалось развитие возмущений на границе двух жидкостей различной плотности в плоской цилиндрической геометрии. Изучалось поведение материалов для случая как имплозии, так и эксплозии. Замечено, что даже небольшие возмущения на границе раздела материалов начинают расти, оказывая на нее влияние. Это замечание также оказалось вполне соответствующим выводам из работы [2].

Наибольший интерес в работе [20] представляет случай падающей ударной волны, которая идет от менее плотного материала к более плотному. В данной конфигурации имеется существенное отличие от случая распространения ударной волны наружу в момент повторного нагружения ударной волной. В случае имплозии падающая ударная волна перемещается из легкой в тяжелую жидкость. После бифуркации передаваемая ударная волна проходит через тяжелую жидкость. Она отражается назад от центра координат через более тяжелую жидкость и возвращается к границе раздела материалов, вызывая инверсию фазы (изменение фазы поверхностного возмущения на противоположную).

В работе [21] изучались вопросы физики развития поверхностных возмущений. Представлено детальное исследование неустойчивости границы раздела между оболочкой из твердого упругопластического материала и цилиндрическим ядром замкнутого газа при импловивном движении, порождаемом ударной волной. Показано, что основной неустойчивостью и в этом случае является неустойчивость Рихтмайера — Мешкова. Она имеет ударно-волновой характер и возникает всякий раз, когда ударная волна пересекает границу раздела материалов. Второстепенными являются инерционная неустойчивость Релея — Тейлора, вызванная ускорением границы раздела, и тангенциальная неустойчивость Кельвина — Гельмгольца, вызванная скольжением между твердым телом и жидкостью. Показано, что при прохождении отраженной ударной волны от оси симметрии увеличивается

скорость роста возмущений на границе раздела, приводя к образованию зоны смешивания, аналогичной случаю жидкость — жидкость, и к потере начальных длин волн поверхностных возмущений.

Отмечено, что движение границы раздела асимптотически сходится к случаю твердое тело — вакуум. При рассмотрении более высокой начальной плотности газа скорость роста возмущений у границы уменьшается, а в некоторых ситуациях ее знак может быть обратным, так как жидкость становится более плотной, чем твердое тело, из-за относительно высокой сжимаемости.

В общем, интерес к вопросам физики устойчивого деформирования твердых, жидких и газообразных тел находится на достаточно высоком уровне. Это демонстрируют работы последних лет [21, 22], посвященные, в частности, совершенствованию расчетно-теоретических методов исследования неустойчивости и изучению физики процесса. В качестве такового выступил эйлеров многоматериальный метод для твердых и жидких сред [22]. В результате к 2015 г. сначала был проведен расширенный параметрический численный анализ, результаты которого уже носили не только качественный, но и количественный характер. Были получены и достаточно интересные обобщенные соотношения между определяющими параметрами исследуемого процесса: начальной амплитудой поверхностных возмущений, скоростью их роста, плотностью и пределом текучести материала. Модуль объемного сжатия и модуль сдвига пока остались за пределами перечня параметров, оказывающих существенное влияние на развитие поверхностной неустойчивости.

Исследование неустойчивости Рихтмайера — Мешкова показало, что она может проявляться в довольно разнообразных условиях, но при неизменном условии наличия ударной волны, взаимодействующей с границей раздела разнородных сред или со свободной поверхностью. Примером такого течения является возможный вариант инерционного синтеза [23] посредством удара алюминиевой пластины по свинцовой пластине, в которой выполнена коническая полость, заполненная дейтерием. Здесь на границе алюминий — свинец проявляется неустойчивость Рихтмайера — Мешкова. При этом на начальной стадии развития малых возмущений проявляется их инверсия — изменение одной фазы на другую — противоположную. Рядом с конической полостью формируется устойчивая ударная волна. Попадающие же в зону влияния этой ударной волны малые возмущения будут подавляться.

Следует отметить, что есть и другой вариант неустойчивости, демонстрирующий ее значительную близость к кумуляции. Его можно показать на примере, когда в ходе изучения неустойчивости Рихтмайера — Мешкова рассматривалось воздействие ударной волны на вогнутый профиль в сжимаемой упругопластической среде с образо-

ванием так называемого «выплеска» или «шипа». По-существу, это некий вырожденный вариант формирования кумулятивной струи («выплеска» или «шипа»). Ситуация отличается от традиционной кумуляции лишь геометрическими параметрами, физически же при этом практически полностью воспроизводились условия формирования кумулятивной струи: осевое течение материала, схлопывание материала на оси, струеобразование.

Взрывное диспергирование (взрывное «пыление») металлов и элементов конструкций под действием ударных волн, выходящих на свободную шероховатую поверхность. Работы по взрывному пылению составляют достаточно обширную группу [24–30]. В открытом варианте результаты авторов основополагающих работ этой группы были опубликованы лишь к концу 1990-х годов [24, 25]. Основные выводы звучали так: «При выходе на свободную поверхность металлического образца ударной волны интенсивностью 60...70 ГПа наблюдается выброс частиц размером в диапазоне 1...100 мкм. Выброс носит микрокумулятивный характер и связан с шероховатостью или наличием в образце дефектов и конструктивных элементов». В зависимости от шероховатости свободной поверхности и материала скорость частиц при выбросе может составлять 4,5...6,5 км/с, при этом превышает скорость свободной поверхности в 1,17–1,8 раз [23].

Отмечено, что динамическое диспергирование представляет большой практический интерес, например, с точки зрения оценки и образования мелкой фракции осколков ядерно-активных материалов в гипотетически аварийных ситуациях на атомных станциях. Пока же внимание было уделено более известным явлениям: множественному отколу, образованию струи в кумулятивном заряде и ее последующему распаду вследствие возникновения градиента скоростей по длине, дроблению оболочек либо компактных тел за счет накопленного запаса упругой энергии или инерционных сил.

В работах [24–30] рассмотрены различные источники диспергирования, нарушающие осевую симметрию процесса и отклоняющие от идеальной работу оболочечных устройств на принципе имплозии. Это сквозные дефекты оболочек, дефекты вблизи внутренней поверхности оболочки, стыковые зазоры на оболочках, локальные полости на оболочках, присоединенные массы в виде пластин и др. Рассмотрены имеющие общую природу с диспергированием металлов взаимодействие металлического лайнера с сосредоточенными элементами и передача возмущений по ним. Показано, что такие возмущения могут намного опережать основную ударную волну, а их амплитуда может достигать 0,3 ГПа.

Судя по публикациям последних лет, в настоящее время наибольший интерес в рассматриваемой области вызывают вопросы уточнения формирования и последующего поведения пылевых струй

(особенно тех, что обусловлены наличием конструктивных элементов), вопросы создания новых, более совершенных экспериментальных методик регистрации их параметров [27–30]. Например, согласно работе [27], при ударно-волновом пылении с шероховатой поверхности твердого свинца ($p = 17$ ГПа и $Rz = 30 \dots 40$ мкм) выбрасываются струи, состоящие из отдельных частиц размером 18 мкм. В случае плавления свинца под воздействием ударной волны с поверхности ($p = 34$ ГПа и $Rz = 20 \dots 50$ мкм) выбрасываются сплошные микрокумулятивные струи, которые со временем распадаются на частицы средним размером примерно 6 мкм. С практической точки зрения особенно интересно то, что с зеркальной поверхности ($Ra = 0,1$ мкм) выбрасываются лишь отдельные мелкие частицы (менее 5 мкм), следовательно, процесс пыления здесь идет менее интенсивно, чем с шероховатой поверхности.

Заключение. Вопросы развития неустойчивости при динамическом деформировании твердых, жидких и газообразных тел и по сей день остаются недостаточно изученными, поэтому соответствующие работы в этой области, как правило, содержат существенные признаки новизны и достаточно актуальны. Из анализа приведенных работ следует, что наибольший вклад в развитие неустойчивости оболочек вносят ударно-волновая неустойчивость Рихтмайера — Мешкова (стартовая или повторная), а также инерционно-разгонная (или инерционно-тормозящая) неустойчивость Релея — Тейлора.

На практике зачастую наблюдается такой случай проявления неустойчивости — металлические кумулятивные облицовки схлопываются под действием взрывного нагружения. Следует отметить, что для этого случая исследований сейчас отсутствует широкий параметрический анализ неустойчивости оболочек. До сих пор остаются неясными причины и механизм развития неустойчивости. Полученные оценки являются качественными, но требуется их дальнейшее изучение.

На основании анализа работ можно выдвинуть предположение о единой природе неустойчивости во всех рассмотренных исследованиях. При неустойчивости оболочек, в струйных течениях деформируемых тел под действием ударной волны, выходящей на свободную поверхность тела, при пылевых выбросах с поверхностей — во всех этих трех случаях определяющими факторами являются гидродинамические неустойчивости Рихтмайера — Мешкова и Релея — Тейлора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Elliot L.A. Calculation of the Growth of Interface Instabilities by a Lagrangian Mesh Method. *4th Intern. Symp. On Detonation*. Washington, 1967, pp. 316–320.
- [2] Бабкин А.В., Бондаренко П.А., Федоров С.В. и др. Предельно допустимые параметры импульсного теплового воздействия на кольцевые системы с энергетическим материалом. *Оборонная техника*. 2000, № 1–2, с. 35–40.

- [3] Бабкин А.В., Бондаренко П.А., Ладов С.В., Федоров С.В. Ограничения возможностей повышения пробития кумулятивного заряда при импульсном тепловом воздействии на его облицовку. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Труды Международной конференции III Харитоновские тематические научные чтения*. Саров, ВНИИЭФ, 2002, с. 257–263.
- [4] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.М. и др. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 7–8.
- [5] Колпаков В.И., Плетнев С.Л. Влияние предварительного нагрева облицовки на эффективность действия кумулятивных зарядов. *Тезисы докладов IV Международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике»*. Новосибирск, ИГ СО РАН, 1995, с. 125.
- [6] Кореньков В.В., Обухов А.С., Смеликов В.Г. Увеличение глубины пробития стальной преграды зарядом с предварительно нагретой кумулятивной облицовкой. *Двойные технологии*, 1999, № 4, с. 53–54.
- [7] Иванов А.Г., Лавровский Ю.Д., Огородников В.А. Некоторые случаи развития детерминированных возмущений на сходящихся оболочках. *Прикладная механика и техническая физика*, 1992, т. 33, № 5, с. 116–119.
- [8] Иванов А.Г., Огородников В.А., Карпенко Г.Я. и др. О влиянии сдвиговой прочности на развитие неустойчивости при торможении сходящихся оболочек. *Прикладная механика и техническая физика*, 1994, т. 35, № 4, с. 163–167.
- [9] Дреннов О.Б., Михайлов А.Л., Огородников В.А. О задании и эволюции локальных (периодических) возмущений в экспериментах по исследованию неустойчивости Рэлея — Тейлора в средах с прочностью. *Прикладная механика и техническая физика*, 2000, т. 41, № 2, с. 171–176.
- [10] Чарахчян А.А. Неустойчивость Рихтмайера — Мешкова на границе раздела сред при прохождении через нее двух последовательных ударных волн. *Прикладная механика и техническая физика*, 2000, т. 41, № 1, с. 28–37.
- [11] Голубятников А.Н., Зоненко С.И., Черный Г.Г. Новые модели и задачи теории кумуляции. *Успехи механики*, 2005, т. 3, № 1, с. 31–31.
- [12] Орленко Л.П. *Физика взрыва*. Изд. 3-е, испр. В 2 т., т. 2. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2004, 656 с.
- [13] Пай В.В., Титов В.М., Лукьянов Я.Л., Пластинин А.В. Исследование неустойчивости конической облицовки в процессе формирования кумулятивной струи. *Физика горения и взрыва*, 2019, т. 54, № 4, с. 69–73.
- [14] Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Шорохов Е.В. Деформационные явления при схождении металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости. *Физика горения и взрыва*, 2019, т. 55, № 4, с. 92–102.
- [15] Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Шорохов Е.В. Деформационно-температурные процессы, происходящие при схлопывании толстой цилиндрической оболочки из стали 20. *Физика металлов и металловедение*, 2015, № 3, с. 300–308.
- [16] Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Шорохов Е.В. Фазовые и структурные превращения в низкоуглеродистой стали, происходящие при схлопывании цилиндрической оболочки. *Физика металлов и металловедение*, 2017, № 7, с. 715–724.
- [17] Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Шорохов Е.В. Металлографическое исследование структурных изменений в меди, происходящих при схождении цилиндрических оболочек. *Физика металлов и металловедение*, 2019, № 4, с. 381–388.

- [18] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Y.M., Ladov S.V. Compact element formation for modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth condition. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, no. 10, pp. 34–43.
- [19] Огородников В.А., Михайлов А.Л., Романов А.В. и др. Моделирование струйных течений при выходе ударной волны на профилированную свободную поверхность. *Прикладная механика и техническая физика*, 2007, т. 48, № 1, с. 16–23.
- [20] Qiang Z., Graham M.J. A numerical study of Richtmyer–Meshkov instability driven by cylindrical shocks. *Physics of Fluids*, 1998, vol. 974, № 10. DOI: 10.1063/1.869624
- [21] Lopez Ortega A., Lombardini M., Barton P., et. al. Richtmyer–Meshkov instability for elastic–plastic solids in converging geometries. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 2015, vol. 76, pp. 291–324.
- [22] Lopez Ortega A., Lombardini M., Pullin D., Meiron D. Numerical simulations of the Richtmyer–Meshkov instability in solid–vacuum interfaces using calibrated plasticity laws. *Physical Review*, 2014, vol. 89 (3), art. no. 033018. DOI: 10.1103/PhysRevE.89.033018
- [23] Чарахчян А.А. Об устойчивости кумулятивных струй, возникающих при импульсном воздействии на конические мишени. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 3, с. 9–13.
- [24] Огородников В.А., Иванов А.Г., Михайлов А.Л. и др. О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц. *Физика горения и взрыва*, 1998, т. 34, № 3, с. 103–107.
- [25] Огородников В.А., Иванов А.Г., Крюков Н.И. Ударно-волновое диспергирование конструкционных материалов. *Физика горения и взрыва*, 1999, т. 35, № 5, с. 122–126.
- [26] Огородников В.А., Романов Ф.В., Ерунов С.В. и др. Взаимодействие металлического лайнера с сосредоточенными элементами и передача возмущений по ним. *Физика горения и взрыва*, 2008, т. 44, № 6, с. 107–113.
- [27] Невмержицкий Н.В., Раевский В.А., Сотсков Е.А. [и др.]. Некоторые особенности выброса частиц с поверхности ударно-нагруженного свинцового образца. *Физика горения и взрыва*, 2018, т. 54, № 5, с. 82–89.
- [28] Чудаков Е.Ф., Федоров А.В., Финюшин С.А. и др. Регистрация скорости и удельной массы потока частиц, выбрасываемых с поверхности металлов при их ударно-волновом нагружении. *Физика горения и взрыва*, 2018, т. 54, № 5, с. 90–95.
- [29] Тен К.А., Пруэлл Э.Р., Кашкаров А.О. и др. Регистрация выброса частиц из ударно нагруженных металлов методами синхротронного излучения. *Физика горения и взрыва*, 2018, т. 54, № 5, с. 103–111.
- [30] Власов А.Н., Журавлев А.В., Пашенцев В.А. и др. Рентгенографическое исследование динамики развития пылевых струй с поверхности металла. *Физика горения и взрыва*, 2019, т. 55, № 4, с. 42–60.

Статья поступила в редакцию 16.06. 2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бабкин А.В., Новосельцев А.С., Ладов С.В. Проявление неустойчивости при схлопывании металлических облицовок кумулятивных зарядов и в родственных струйных течениях динамически деформируемых профилированных тел. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-7-2091>

Бабкин Александр Викторович — д-р техн. наук, чл.-кор. РАЕН, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области физики взрыва и численного моделирования динамических процессов. e-mail: ps-os@bmstu.ru

Новосельцев Алексей Сергеевич — аспирант кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 5 научных работ в области численного моделирования динамических процессов. e-mail: novoseltsev.alexey@yandex.ru

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, чл.-кор. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Manifestations of instability during the collapse of metal liners of shaped charges and in related jet flows of dynamically deformed profiled bodies

© A.V. Babkin, A.S. Novoseltsev, S.V. Ladov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper briefly analyzes a number of published works devoted to cumulative explosion under conditions of the possible development of surface instability of the collapsing liner of a shaped charge. Most studies stated that surface instability was initially initiated by harmonic surface disturbances or disturbances in the parameters of a given load simulating an explosive one. The instability manifested itself in the form of the development of surface disturbances over time; the absence or limited growth was considered as the preservation of the stability of the deformable shell. In addition to the influence of instability on cumulative processes, related jet flows were also investigated. This is the so-called explosive dispersion (dusting), which occurs both under the influence of the interference of shock waves and unloading waves, and in the presence of initial disturbances of the surface shape. The analysis is built within the framework of the phenomenological approach — both the main results of the experiments and their mathematical descriptions were considered, which in most cases were carried out from the positions established in the mechanics of continuous media, as well as with the help of numerical modeling. Based on the results, conclusions were formulated about the reasons and forms of manifestation of surface instability of collapsing metal liners of shaped charges, the nature of the development and parameters of functioning of such charges, as well as about the features and laws of this process.

Keywords: cumulation, shaped charge, liner, collapse, jet flow, dynamic deformation, surface disturbances, instability

REFERENCES

- [1] Elliot L.A. Calculation of the Growth of Interface Instabilities by a Lagrangian Mesh Method. *4th Int. Symp. on Detonation*. Washington, 1967, pp. 316–320.
- [2] Babkin A.V., Bondarenko P.A., Fedorov S.V., et al. *Oboronnaya tekhnika (Defense technology)*, 2000, no. 1–2, pp. 35–40.
- [3] Babkin A.V., Bondarenko P.A., Ladov S.V., Fedorov S.V. Ogranicheniya vozmozhnostey povysheniya probitiya kumulyativnogo zaryada pri impulsnom teplovom vozdeystvii na ego oblitsovku. Ekstremalnye sostoyaniya veschestva. Detonatsiya. Udarnye volny [Limitations of the possibilities of increasing the penetration of the shaped charge with a pulsed thermal effect on its liner. Extreme states of matter. Detonation. Shock waves]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii III Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya* [Proceedings of the International Conference III Kharitonov Thematic Scientific Readings]. Sarov, VNIIEF Publ., 2002, pp. 257–263.
- [4] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.M., et al. *Tekhnologiya metallov — Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, no. 11, pp. 7–8.
- [5] Kolpakov V.I., Pletnev S.L. Vliyaniye predvaritel'nogo nagreva oblitsovki na effektivnost deystviya kumulyativnykh zaryadov [Influence of liner preheating on the efficiency of shaped charges]. *Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Lavrentevskie chteniya po matematike, mekhanike i fizike»* [Abstracts of the IV International Conference "Lavrentyev Readings on Mathematics, Me-

- chanics and Physics"]. Novosibirsk, Institute of Geography, RAS Publ., 1995, p. 125.
- [6] Korenkov V.V., Obukhov A.S., Smelikov V.G. *Dvoynye tekhnologii (Dual technologies)*, 1999, no. 4, pp. 53–54.
- [7] Ivanov A.G., Lavrovskiy Yu.D., Ogorodnikov V.A. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1992, vol. 33, no. 5, pp. 116–119.
- [8] Ivanov A.G., Ogorodnikov V.A., Karpenko G.Ya., et al. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1994, vol. 35, no. 4, pp. 163–167.
- [9] Drennov O.B., Mikhaylov A.L., Ogorodnikov V.A. *Prikladnaya mekhanika I tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 2, pp. 171–176.
- [10] Charakhchyan A.A. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 28–37.
- [11] Golubyatnikov A.N., Zonenko S.I., Cherny G.G. *Uspekhi mekhaniki (Achievements in mechanics)*, 2005, vol. 3, no. 1, pp. 31–31.
- [12] Orlenko L.P. *Fizika vzryva [Physics of explosion]*. In 2 vols., vol. 2. 3rd ed., rev. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 656 p.
- [13] Pay V.V., Titov V.M., Lukyanov Ya.L., Plastinin A.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2019, vol. 54, no. 4, pp. 69–73.
- [14] Zeldovich V.I., Frolova N.Yu., Kheyfets A.E., Shorokhov E.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 92–102.
- [15] Zeldovich V.I., Frolova N.Yu., Kheyfets A.E., Shorokhov E.V. *Fizika metallov i metallovedenie — Physics of Metals and Metallography*, 2015, no. 3, pp. 300–308.
- [16] Zeldovich V.I., Frolova N.Yu., Kheyfets A.E., Shorokhov E.V. *Fizika metallov i metallovedenie — Physics of Metals and Metallography*, 2017, no. 7, pp. 715–724.
- [17] Zeldovich V.I., Frolova N.Yu., Kheyfets A.E., Shorokhov E.V. *Fizika metallov i metallovedenie — Physics of Metals and Metallography*, 2019, no. 4, pp. 381–388.
- [18] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Y.M., Ladov S.V. Compact element formation for modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth condition. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, no. 10, pp. 34–43.
- [19] Ogorodnikov V.A., Mikhaylov A.L., Romanov A.V., et al. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 1, pp. 16–23.
- [20] Qiang Z., Graham M.J. A numerical study of Richtmyer–Meshkov instability driven by cylindrical shocks. *Physics of Fluids*, 1998, vol. 974, no. 10. DOI: 10.1063/1.869624
- [21] Lopez Ortega A., Lombardini M., Barton P., et al. Richtmyer–Meshkov instability for elastic–plastic solids in converging geometries. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 2015, vol. 76, pp. 291–324.
- [22] Lopez Ortega A., Lombardini M., Pullin D., Meiron D. Numerical simulations of the Richtmyer–Meshkov instability in solid–vacuum interfaces using calibrated plasticity laws. *Physical Review*, 2014.
- [23] Charakhchyan A.A. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 3, pp. 9–13.
- [24] Ogorodnikov V.A., Ivanov A.G., Mikhaylov A.L., et al. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1998, vol. 34, no. 3, pp. 103–107.

- [25] Ogorodnikov V.A., Ivanov A.G., Kryukov N.I. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 122–126.
- [26] Ogorodnikov V.A., Romanov F.V., Erunov S.V., et al. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2008, vol. 44, no. 6, pp. 107–113.
- [27] Nevmerzhiitskiy N.V., Raevskiy V.A., Sotskov E.A., et al. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 82–89.
- [28] Chudakov E.F., Fedorov A.V., Finyushin S.A., et al. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 90–95.
- [29] Ten K.A., Pruell E.R., Kashkarov A.O., et al. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 103–111.
- [30] Vlasov A.N., Zhuravlev A.V., Pashentsev V.A., et al. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 42–60.

Babkin A.V., Dr Sc. (Eng.), Corresponding Member RANS, Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of over 250 research papers in the field of physics of explosion and numerical simulation of dynamic processes. e-mail: pc-os@bmstu.ru

Novoseltsev A.S., post-graduate student, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of over 5 research papers in the field of numerical simulation of dynamic processes. e-mail: novoseltsev.alexey@yandex.ru

Ladov S.V., Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member RANS, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University; author of over 350 in the field of physics of explosion. e-mail: ladovsv@bmstu.ru