

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛАЙНЕРА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ПЕРЕДАЧА ВОЗМУЩЕНИЙ ПО НИМ

В. А. Огородников¹, А. В. Романов¹, С. В. Ерунов¹, Е. Ю. Боровкова¹,
А. И. Давыдов², Г. А. Рогожкин², Е. А. Пронин²

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва, 607190 Саров

²РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт теоретической и математической физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Представлены результаты экспериментального и численного исследования взаимодействия металлического лайнера, разгоняемого с помощью взрыва до скорости несколько километров в секунду, с сосредоточенными элементами в виде пластины. Приведены также количественные данные параметров возмущений, передаваемых по этим элементам.

Ключевые слова: взрывные генераторы, лайнер, мишень, сосредоточенные элементы, опережающее возмущение.

Металлические лайнеры плоской, цилиндрической или сферической геометрии, разгоняемые энергией взрыва до скоростей несколько километров в секунду, часто используются во взрывных генераторах для получения высоких динамических давлений [1]. В ряде практически важных случаев при движении они могут взаимодействовать с различными сосредоточенными элементами в виде полосы металла (ребро жесткости, опора) [2, 3] или стержня (электрод, участок кабельной линии) [4, 5]. Качественная картина такого взаимодействия хорошо изучена. Так, например, в [3, 4] показано, что процессы взаимодействия пластины или стержня с движущимися пластиной или цилиндрической оболочкой мало отличаются и происходят с образованием струй из их материала, а вытесненный материал распределяется между ними с образованием полости. Количественная же сторона рассматриваемых процессов, связанная с определением амплитуды возмущений, передаваемых по сосредоточенным элементам, менее изучена.

Для получения детальной количественной информации могут быть использованы хорошо протестированные двумерные численные расчеты. Обычно для их тестирования используются результаты экспериментов в упрощенной постановке. В данной работе для тестирования двумерных расчетов использовали достаточно сложную постановку опытов, которая близко

моделировала реальные процессы.

При ударно-волновом нагружении сосредоточенных элементов (пластин, стержней) формируемые в них ударные волны (УВ) со временем вырождаются в звуковые возмущения. Поскольку эти возмущения распространяются со скоростью звука в пластине или стержне, которая может быть больше скорости лайнера, разгоняемого во взрывном генераторе, то они могут прийти в исследуемую мишень раньше, чем УВ, генерируемая в мишени ударом лайнера, и внести искажения, влияющие на интерпретацию результатов опыта. Ясно, что особенно важным является вопрос об определении амплитуды этих возмущений. Предварительный анализ показал, что амплитуда рассматриваемых возмущений в зависимости от конкретных условий работы различных взрывных генераторов может изменяться от 0.01 до 0.1 ГПа, а их длительность достигать 10 мкс. В данной работе для определения количественных характеристик возмущений (амплитуда, время) применяли методику емкостного датчика [6], а для визуализации процесса использовали, как и в [3], методику импульсной рентгенографии и метод отлетающего индикатора.

Постановка опытов по исследованию возмущений, передаваемых по сосредоточенным элементам, представлена на рис. 1. Использовали заряд взрывчатого вещества (ВВ) состава ТГ 50/50 диаметром 120 мм и высотой

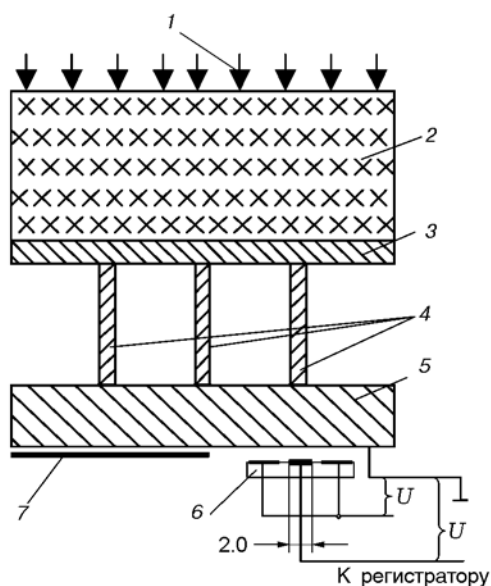


Рис. 1. Схема постановки опытов:

1 — инициирование заряда ВВ по всей поверхности, 2 — заряд ВВ, 3 — лайнер (пластина-ударник), 4 — сосредоточенные элементы (пластины), 5 — мишень, 6 — емкостный датчик, 7 — отлетающий индикатор, установленный на свободной поверхности мишени

60 мм, который инициировали по всей поверхности с помощью генератора плоской УВ. Время работы генератора составляло $t_0 = 25 \pm 0.1$ мкс. Заряд ВВ располагали на пластине-ударнике (лайнере) из меди (марки М1) толщиной 6.5 мм. В качестве сосредоточенных элементов использовали пластины высотой 40 мм и толщиной $1.8 \div 3.0$ мм из алюминия (марки АМг-6) и стали (марок Ст. 3 и 30ХГСА), которые вплотную (без зазора) устанавливали между разгоняемым лайнером и мишенью. Мишенью служил диск из меди диаметром 120 мм и толщиной 20 мм. Такая постановка опыта позволяет разогнать лайнер до скорости ≈ 2.0 км/с.

Проведено две серии опытов. В первой серии на свободной поверхности мишени устанавливали отлетающий индикатор в виде фольги из свинца или алюминия толщиной 0.2 мм и проводили рентгенографирование процесса в различные моменты времени t_γ . При этом исследовали взаимодействие лайнера с двумя или тремя пластинами, отличающимися толщиной или материалом (сталь, алюминий). Моменты времени t_γ определяли с учетом времени работы генератора плоской УВ t_0 . Во второй серии опытов проводили непре-

рывную регистрацию скорости свободной поверхности мишени с помощью емкостного датчика. В этих опытах устанавливали по диаметру мишени только один сосредоточенный элемент в виде пластины. Емкостный датчик размещали на свободной поверхности мишени под местом расположения этого сосредоточенного элемента (в центре мишени) и ориентировали вдоль него. Основной электрод емкостного датчика имел прямоугольную форму размером 2×40 мм. Зазор между ним и исследуемой поверхностью, являющейся вторым электродом емкостного датчика, выставлялся с точностью 0.01 мм и составлял 0.24 мм. На обкладки емкостного датчика подавали напряжение 300 В. Охранный электрод шириной 5 мм, обеспечивающий однородность электрического поля на датчике, располагали по периметру основного электрода. При такой постановке опыта исключалось заметное влияние на результаты измерений формы лайнера, связанной с боковой разгрузкой. Погрешность определения скорости свободной поверхности с помощью емкостного датчика в диапазоне реализуемых в опытах скоростей до 50 м/с оценивали величиной ± 20 %.

На рис. 2 приведены результаты рентгенографических опытов. Во всех опытах к моменту рентгенографирования t_γ возмущения, передаваемые по сосредоточенным элементам (пластинам), достигали свободной поверхности мишени раньше основной УВ, формируемой в мишени ударом пластины-ударника. Качественная картина процесса взаимодействия пластины-ударника и сосредоточенных элементов (пластин) достаточно хорошо укладывается в рамки гидродинамических представлений. Из области контакта пластины-ударника с сосредоточенными элементами (область А на рис. 2, б) генерируются струйные течения (области В, Г) с образованием полости вблизи сосредоточенного элемента, а сама область контакта со временем отстает от других участков пластины-ударника. Наличие отлетающего индикатора свидетельствует о том, что до момента выхода основной УВ (от удара лайнером по мишени) на свободную поверхность мишени заметных возмущений под сосредоточенными элементами (пластинами) не наблюдается (рис. 2, а, в, з), хотя во все моменты рентгенографирования передаваемые по ним возмущения ее достигали. В более поздние моменты времени после выхода основной УВ на свобод-

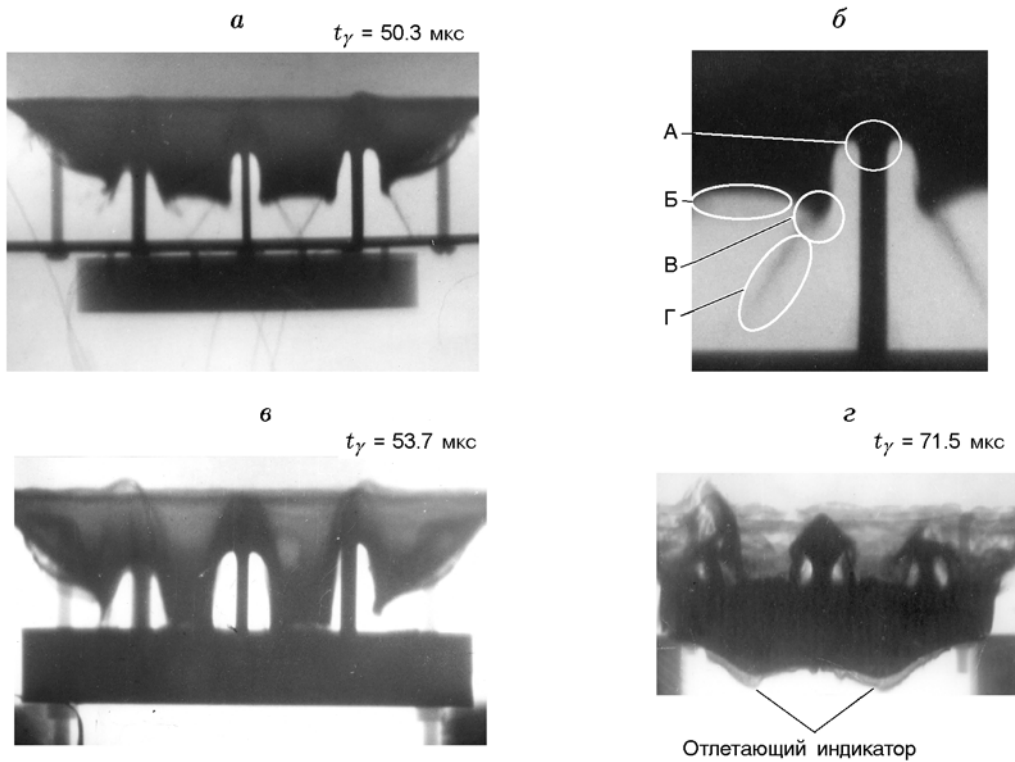


Рис. 2. Рентгенограммы опытов:

a, в, г — состояние процессов в различные моменты времени; *б* — детали взаимодействия лайнера и элементов крепления: А — область контакта лайнера и сосредоточенного элемента, Б — основная поверхность лайнера, В, Г — струйные течения

ную поверхность мишени отлетающий индикатор отчетливо регистрируется на рентгенограммах (рис. 2, *г*). Его форма свидетельствует об отставании свободной поверхности именно в области расположения сосредоточенных элементов. То есть можно отметить, что сосредоточенные элементы могут вносить заметный вклад в симметрию фронта основной УВ в мишени. Видно, что форма свободной поверхности мишени становится достаточно искривленной после выхода на нее основной УВ (см. рис. 2, *г*).

Количественные характеристики возмущений (амплитуды, длительности), передаваемых по сосредоточенным элементам в мишень, определяли, используя методику емкостного датчика. Характерный профиль скорости свободной поверхности мишени $v(t)$ под местом расположения сосредоточенного элемента в виде пластины из стали толщиной 3 мм изображен на рис. 3, а на рис. 4 приведена $x-t$ -диаграмма исследуемого процесса. Начиная с момента времени t_1 , соответствующего выходу

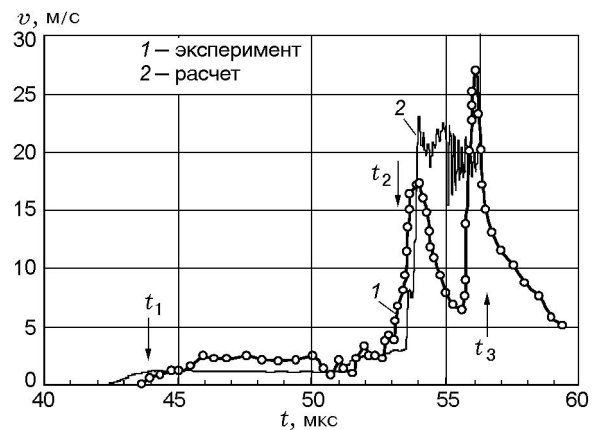


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности мишени

возмущения на свободную поверхность, в течение ≈ 9 мкс датчики регистрируют ее смещение со скоростью $1 \div 3$ м/с, что соответствует давлению в медной мишени $0.02 \div 0.05$ ГПа. В момент времени t_2 датчики регистрируют подъем скорости до $6 \div 17$ м/с, что соответствует

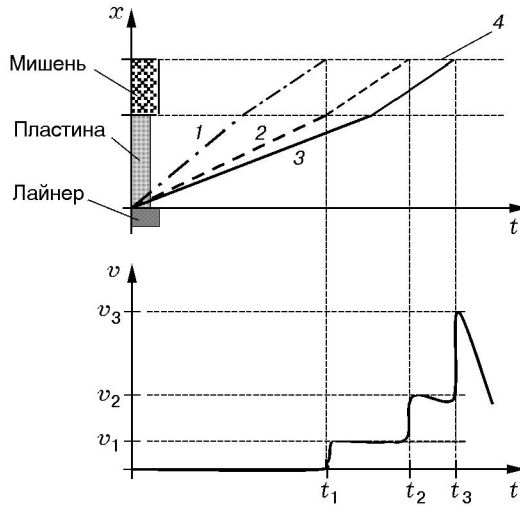


Рис. 4. $x-t$ -Диаграммы процесса передачи возмущений:

1 — движения возмущений по сосредоточенному элементу и в мишени, 2 — движения струйного течения и УВ в мишени, 3 — движения лайнера и УВ в мишени, 4 — свободная поверхность мишени

давлению в мишени $0.1 \div 0.3$ ГПа. Этот момент соответствует выходу на свободную поверхность мишени возмущения от удара по ней струйного течения (область В на рис. 2). И наконец, в момент времени t_3 наблюдается резкое возрастание скорости с последующим ее спадом, свидетельствующее о приходе сильной УВ, распространяющейся по мишени при ударе по ней пластиной-ударником (область Б на рис. 2), и о разрушении (замыкании) емкостного датчика. Поскольку скорости свободной поверхности после выхода первой и второй волн были малы ($1 \div 3$ и $6 \div 17$ м/с соответственно), они не оказывали заметного влияния на смещение отлетающего индикатора в рентгенографических опытах (смещение не превышает 0.1 мм), поэтому отлетающий индикатор проявляет себя только в области Б — в области удара пластиной по мишени (см. рис. 2,з). По той же причине влияние материала и толщины сосредоточенного элемента на параметры возмущения выявить затруднительно.

Полученные экспериментальные данные были использованы для тестирования двумерных численных методик Д [7] и ЛЭГАК [8]. Расчеты с использованием схемы опытов, приведенной на рис. 1, проводили в плоскопараллельной двумерной постановке на мелкой сетке (число точек в методиках $\approx 7 \cdot 10^4$ и $\approx 1.75 \cdot 10^6$ соответственно). Слои меди, стали и алюминия

рассчитывали с использованием упругопластической модели [9], реализованной в методиках, которая учитывает зависимость динамического предела текучести Y материала от упругой составляющей давления p_x , удельной тепловой внутренней энергии E_T и накопленной деформации ε_p :

$$Y(p_x, E_T, \varepsilon_p) = Y_0(1 + \alpha_0 p_x) \left[1 - \left(\frac{E_T}{E_{пл}} \right)^l \right] \times \\ \times \left[1 + a_0 \left(1 - \left(\frac{E_T}{E_{пл}} \right)^k \right) (1 - \exp(-m\varepsilon_p)) \right];$$

где Y_0 — статический предел текучести, $E_{пл}$ — удельная энергия плавления, α_0 , l , a_0 , k , m — константы материала в модели.

В расчетах для металлов использовали уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена [10]

$$p = p_x + p_T, \quad E = E_x + E_T,$$

а при их плавлении — закон Линдемана [11].

$$E_{пл} = \begin{cases} E_{пл0} \left(\frac{\delta_{пл}}{\delta_{пл0}} \right)^{2(\Gamma_\infty - 1/3)} \times \\ \times \exp \left[\frac{2(\Gamma_0 - \Gamma_\infty)}{M} \left(\delta_{пл0}^{-M} - \delta_{пл}^{-M} \right) \right] \\ \text{при} \\ \rho \geq \rho_{пл0}, \quad \delta_{пл} = \frac{\rho}{\rho_0 k}, \quad \delta_{пл0} = \frac{\rho_{пл0}}{\rho_0 k}; \\ E_{пл0} \quad \text{при} \quad \rho < \rho_{пл0}. \end{cases}$$

Здесь p , p_x и p_T — полное, «холодное» (упругая составляющая) и тепловое давления соответственно:

$$p_x = \frac{\rho}{n} c_0^2 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \quad p_T = \Gamma \rho (E - E_x);$$

ρ , ρ_0 — текущая и начальная плотности; c_0 — скорость звука; n , M — константы; Γ — коэффициент Грюнайзена:

$$\Gamma = \Gamma_\infty + (\Gamma_0 - \Gamma_\infty) \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^M,$$

E , E_x — суммарная удельная энергия и ее упругая составляющая; $\rho_0 k$, $c_0 k$ — кристаллическая плотность вещества и скорость звука; Γ_0 , Γ_∞ — асимптотические коэффициенты Грюнайзена при $\rho \rightarrow \rho_0$ и $\rho \rightarrow \infty$ соответственно; $E_{пл0}$, $\delta_{пл0}$ — удельная энергия и сжатие, при которых начинается плавление вещества.

Таблица 1

Материал	ρ_{0k} , г/см ³	ρ_0 , г/см ³	c_{0k} , км/с	n	M	Γ_∞	Γ_0	$E_{пл0}$, Дж/г	$\delta_{пл0}$
Ст. 3	7.91	7.89	4.57	4.5	1.2	0.7	1.85	1 086.6	0.91
Сталь 30ХГСА	7.91	7.89	4.57	4.5	1.2	0.7	1.85	1 086.6	0.91
Медь	9.05	8.93	3.95	4.3	1.2	0.7	1.96	528.8	0.93
Алюминий	2.69	2.64	5.50	3.2	1.5	0.67	2.14	858.4	0.94

Таблица 2

Материал	Y_0 , ГПа	a_0	k	m	l	α_0 , ГПа ⁻¹
Ст. 3	0.45	3.0	3.5	15	2	0.02
Сталь 30ХГСА	0.70	3.0	3.5	15	2	0.02
Медь	0.077	9.7	5.0	1.5	1	0.11
Алюминий	0.27	1.4	2.0	2.0	1	0.16

Параметры уравнения состояния и модели для используемых материалов приведены в табл. 1, 2. При расчете детонации ВВ использовали модель Чепмена — Жуге с контролем скорости распространения детонации, для описания продуктов взрыва — уравнение состояния в форме Зубарева [12]:

$$p - p_S(\delta) = \gamma_0 \rho_0 \delta (E - E_S(\delta)),$$

$$E_S(\delta) = A \delta^k + F \exp\left(-\frac{\xi}{\delta}\right),$$

$$p_S(\delta) = A \rho_0 \delta^{k+1} + F \rho_0 \xi \exp\left(-\frac{\xi}{\delta}\right),$$

$$p_S(\delta_{ж}) = p_{ж},$$

где E_S и p_S — энергия и давление на изоэнтропе продуктов взрыва, проходящей через точку Чепмена — Жуге.

Параметры уравнения состояния для состава ТГ 50/50 брали следующие: плотность $\rho_0 = 1.67$ г/см³; сжатие, при котором происходит превращение ВВ в продукты взрыва («зажигание» ВВ), $\delta_{ж} = 1.366$; коэффициенты модели для давления и энергии $A = 3.4594$ кДж/г, $F = 62.03$ кДж/г, $\xi = 4.162$, $n = 0.6$, $\gamma_0 = 0.6$.

К моменту удара лайнера по мишени его скорость по результатам расчетов составила 1.9 км/с, что согласуется со скоростью в экспериментах 2.0 км/с.

Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 5. Здесь в черно-белой палитре

показаны двумерные распределения плотности по диаметральному сечению мишени, перпендикулярному сосредоточенным элементам: до удара лайнера по мишени (рис. 5,а — методика ЛЭГАК и рис. 5,г — методика Д), в момент касания лайнера и мишени (рис. 5,б — методика ЛЭГАК и рис. 5,д — методика Д), после удара и формирования фронта основной УВ в мишени (рис. 5,в — методика Д) и после начала смещения поверхности мишени (рис. 5,е — методика Д). На рис. 5,г,д (расчеты по методике Д) для лучшей визуализации палитра малых возмущений плотности специально подобрана достаточно контрастной. С целью сравнения с экспериментом (см. рис. 2) на рис. 5 моменты времени t_γ приведены, как и в эксперименте, с учетом времени работы генератора ударной волны t_0 ($t_\gamma = t_0 + t_{п}$, где $t_0 = 25$ мкс, $t_{п}$ — время процесса, отсчитанное от начала детонации заряда ВВ в расчете). Из рис. 2 и 5 видно, что расчеты достаточно адекватно воспроизводят экспериментальные данные по состоянию лайнера при его взаимодействии с сосредоточенными элементами, а также процессы нагружения мишени. В расчетах удается проследить не только смещение границ металлических пластин, но и формирование полостей около торцов сосредоточенных элементов и даже образование движения таких тонких деталей, как струи вещества, и зависимость угла раскрытия этих струй и их скоростей от параметров материала элемента крепления (плотность, прочность, толщина и т. п.). Характерный профиль скорости свободной поверхности мишени под сосредоточенным элементом в месте, соответствующем расположению емкостного датчика, полученный в расчетах, представлен на рис. 3, где для сравнения приведен также экспериментально зарегистрированный профиль. Видно удовлетворительное качественное и количественное совпадение профилей скорости в эксперименте и расчете. Согласно расчетам скорость свободной поверхности

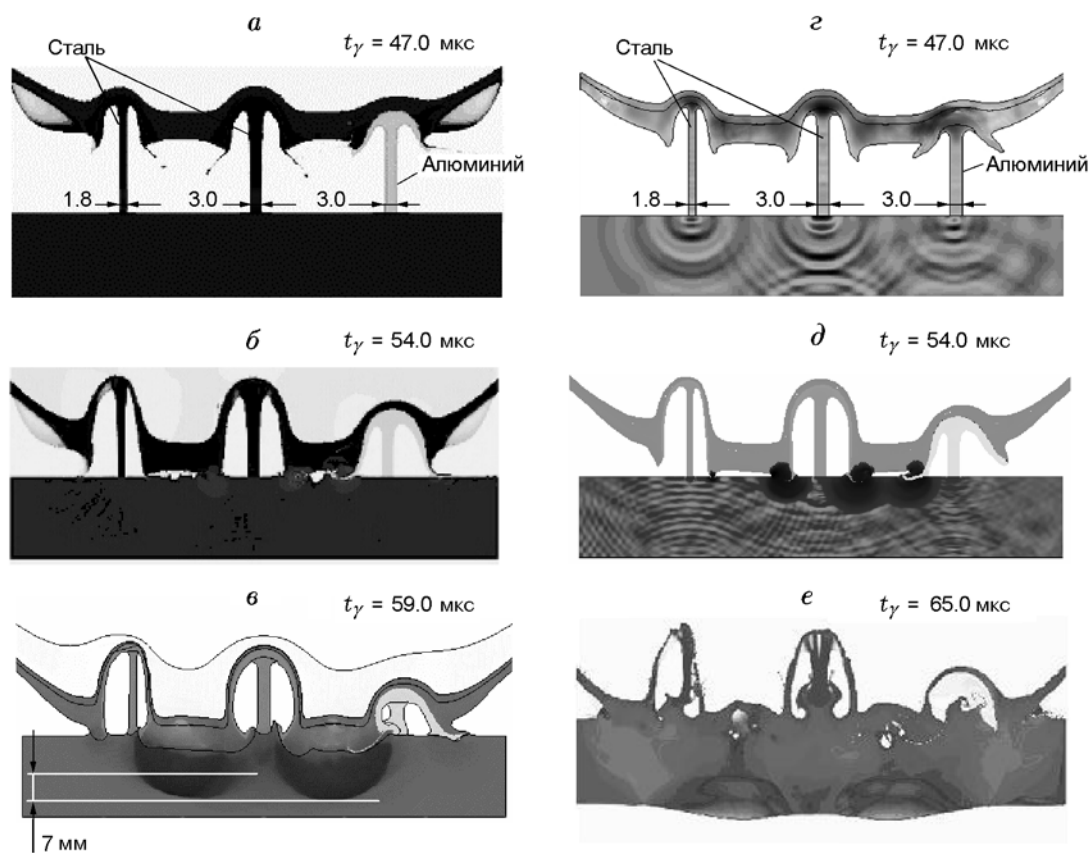


Рис. 5. Результаты двумерных численных расчетов:

a, б — методика ЛЭГАК; *в–e* — методика Д; на рисунке *z* для наглядной визуализации неравномерностей нагрузки лайнера и положения звуковых волн в мишени палитры плотностей лайнера, сосредоточенных элементов и мишени подобраны для каждого в отдельности

мишени на первой волне (от воздействия опережающих возмущений, передаваемых по сосредоточенным элементам с момента времени t_1) составляет ≈ 1 м/с, а в момент времени t_2 (от воздействия струйных течений, вторая волна) скорость увеличивается до ≈ 20 м/с. К моменту времени прихода основной УВ t_3 смещение свободной границы под действием опережающих возмущений составляет всего 0.02 мм.

Из приведенного сравнения можно заключить, что результаты двумерных расчетов по методикам Д и ЛЭГАК, тестированные по экспериментам, проведенным в достаточно сложной постановке, дают не только качественные, но и непротиворечивые количественные характеристики гидродинамических течений при взаимодействии лайнера с сосредоточенными элементами. Это является основанием для использования данных методик при проведении численного моделирования рассмотренных

процессов в реальных конструкциях с получением достоверных результатов. Кроме того, результаты расчетов и экспериментов свидетельствуют о том, что возмущения, передаваемые по сосредоточенным элементам, могут намного опережать основную УВ в мишени, а их амплитуда составляет $0.05 \div 0.3$ ГПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Методы** исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках // Под ред. М. В. Жерноклетова, Б. Л. Глушака. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 427.
2. **Устройство** для динамического сжатия вещества: А. с. 1799137. РФ / Огородников В. А., Тюнькин Е. С., Мишуков В. В. 1992.
3. **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.
4. **Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Огородников В. А., Тюнькин Е. С.** Особенности разгона

- пластин скользящей ДВ при наличии присоединенной или сосредоточенной массы // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 127–129.
5. **Буйко А. М., Иванов А. Г., Лавровский Ю. Д., Огородников В. А.** Струеобразование при высокоскоростном соударении тонкой оболочки с разными преградами // III Забавинские чтения: Тез. докл. Челябинск-70, 1992.
 6. **Иванов А. Г., Новиков С. А.** Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности // Приборы и техника эксперимента. 1963. № 1. С. 135–139.
 7. **Софронов И. Д., Делов В. И., Дмитриева Л. В. и др.** Методика D для расчета многомерных задач механики сплошной среды в переменных Лагранжа на регулярной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1999. Вып. 4. С. 42–50.
 8. **Авдеев П. А., Аргамонов М. В., Бахрах С. М. и др.** Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 3. С. 14–18.
 9. **Глушак Б. Л., Игнатова О. Н., Раевский В. А. и др.** Влияние интенсивной пластической деформации и ударноволнового нагружения на прочность меди // VII Харитоновские чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Саров, 2005.
 10. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных явлений. М.: Наука, 1966.
 11. **Уббелоде А.** Плавление и кристаллическая структура. М.: Мир, 1969. С. 83.
 12. **Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С.** Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ // Прикл. механика и техн. физика, 1969. № 4. С. 127–132.

*Поступила в редакцию 10/IX 2007 г.,
в окончательном варианте — 21/I 2008 г.*