

УДК 623.454.2:544.454.3:534.1

С. И. Герасимов, В.А. Кузьмин

**К ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров

Приведен анализ состояния проблемы моделирования механического действия импульса рентгеновского излучения (РИ) на тонкостенные конструкции, а также представлены некоторые результаты численного моделирования поведения цилиндрической оболочки при действии характерной для механического импульса РИ нагрузки.

Ключевые слова: механический импульс, рентгеновское излучение, высокоинтенсивное излучение, экспериментальное моделирование, взрывчатое вещество, светочувствительное взрывчатое вещество.

При создании современной техники большое внимание уделяется исследованию процессов, протекающих при воздействии высокоинтенсивных потоков энергии на вещество: рентгеновское излучение (РИ), мощное электромагнитное излучение оптического диапазона (лазер), потоки заряженных частиц. Наибольший практический интерес представляет воздействие РИ.

Одним из основных поражающих факторов РИ при облучении какого-либо объекта является механическое воздействие на этот объект [1]. Механическое воздействие (механический импульс) пропорционально количеству поглощенной материалом энергии (энергии сублимации).

В практической деятельности воздействие рентгеновского излучения, например на летательные аппараты, имеет место при ядерном взрыве в космосе, или в установках, эксплуатация которых связана с импульсными потоками излучений [2]. Методология и математическое описание процесса формирования импульса давления на поверхности облучаемого материала сформулированы в середине XX века [3].

Физический механизм возникновения механического импульса при действии высокоинтенсивного излучения также хорошо изучен как в лабораторных условиях на малых моделях, так и при проведении полномасштабных опытов в период разрешенных подземных ядерных испытаний.

Энергия высокоинтенсивного излучения поглощается тонким поверхностным слоем облучаемого материала. В массе поглощенного слоя возникают высокие плотности энергии, значительно превышающие энергию сублимации. В результате этого облучаемое вещество почти мгновенно разогревается до степени перехода в газообразное, сублимированное, состояние. Вследствие этого в слое материала развиваются высокие давления, достигающие нескольких тысяч атмосфер. Происходит быстрый разлет сублимированного вещества со свободной поверхности и образование ударной волны, распространяющейся вглубь холодного материала. Всей конструкции сообщается механический импульс отдачи, численно равный интегралу $\int p(t)dt$, где $p(t)$ – давление, действующее на границу раздела твердого и сублимированного веществ.

Удельный импульс при падении излучения по нормали к поверхности (J_0) вычисляется по известным значениям поглощенной энергии сублимации материала. Угловое распределение удельного импульса дается выражением

$$J = J_0 \cos(\varphi), \quad (1)$$

где φ - угол между направлением потока излучения и нормалью к облучаемой поверхности. Значение импульса, созданного разлетом сублимированного вещества, может увеличиться из-за возможных отколов вблизи границы с сублимированной частью материала. В этом случае большую часть суммарного механического импульса, сообщенного материалу, составляет импульс отдачи разлета откольных слоев. Характерное время действия импульса равно времени распространения волны разрежения от свободной поверхности до поверхности откола и составляет несколько десятых микросекунды [2].

Основным методом исследования поведения элементов конструкций при действии механического импульса на данный момент является проведение испытаний полномасштабных образцов при нестационарном нагружении устройствами воспроизведения механического действия высокоинтенсивных излучений.

Существующие методы и установки для исследования и моделирования действия высокоинтенсивных потоков излучения разделяют на три группы:

- для генерации высокоэнергетического излучения;
- моделирования действия высокоэнергетического излучения импульсными пучками частиц;
- газодинамические методы моделирования механического действия высокоэнергетического излучения.

К первой группе относятся установки для генерации мощных потоков излучения с использованием высокотемпературной плазмы.

Ко второй группе относятся генераторы мощных пучков частиц, преимущественно электронов.

Достаточно подробно лабораторные установки и комплексы рассмотрены в работах [4, 5].

Экспериментальные исследования стойкости полномасштабных конструкций к воздействию механического импульса, являющегося результатом действия мощного высокоэнергетического излучения с использованием методов и установок первой и второй групп, не представляются возможным в связи с отсутствием соответствующих лабораторных источников излучения, способных генерировать необходимые плотности на поверхностях с размерами порядка нескольких метров.

Наиболее удобными для реализации на испытательных площадках являются методы и установки третьей группы.

К этой группе относятся методы и установки, в которых нагружение конструкции осуществляется ударной волной от взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) или электро-взрыва проводников.

К одному из способов создания импульсной нагрузки третьей группы относится метод скользящей детонации тонкого листового ВВ. Основные его достоинства - относительная простота, возможность нагружения поверхностей с большой площадью и испытания в полигонных условиях конструкций сложной формы. Энергетические и геометрические параметры ВВ позволяют изменять амплитуды и длительности нагрузок в широких пределах и независимо друг от друга. Помимо задания геометрии и использования различных ВВ, на характер импульса нагрузки влияют способы и временная последовательность детонирования, а также механические свойства прокладок между зарядом и испытываемыми элементами конструкций. Длительность импульса при газодинамическом методе может варьироваться в интервале $10^{-6} \dots 10^{-3}$ с, а импульс давления – $0,5 \dots 5$ кПа·с.

Наряду с очевидными преимуществами, данный метод имеет и существенные недостатки. Для испытаний многих конструкций требуется создание импульса меньшего, чем при скользящей детонации слоя пластического ВВ минимальной толщины (порядка 0,5 мм). С этой целью применяются перфорированные листы ВВ, в которых удельная масса ВВ уменьшается за счет равномерно расположенных отверстий как показано на рис. 1.

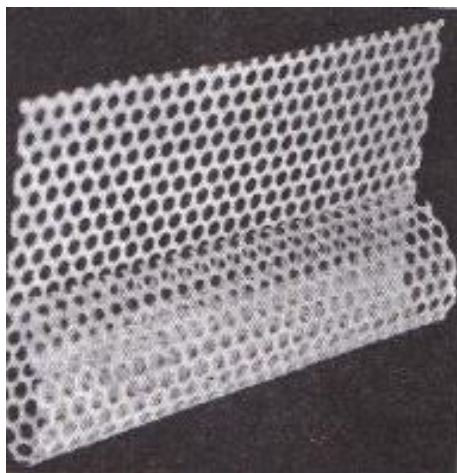


Рис. 1. Перфорированный лист ВВ

Выбранный диаметр отверстий и схема их расположения позволяют уменьшить удельную массу ВВ (и соответственно механический импульс). При одноточечном инициировании ВВ существует разновременность приложения нагрузки (10-100 мкс) по поверхности объектов с характерным размером 0,1 -1 м, а также возникают трудности организации детонации по всей поверхности, прерывание детонации в листовом ВВ из-за уменьшения толщины до критической величины, при которой детонация не происходит. Подобное нагружение существенно влияет на картину деформирования оболочечных конструкций.

Дальнейшее совершенствование газодинамического (взрывного) метода воспроизведения механического действия высокоинтенсивного излучения связано с решением вопроса о малых уровнях воздействия. Необходима разработка методик формирования малых и сверхмалых импульсов давления.

Для этих целей некоторыми исследователями [8] предложено использовать сверхтонкие листовые ВВ, полученные с использованием метода термовакуумного напыления. Критическая толщина слоя, при которой возможна детонация, составляет 50-80 мкм. Это почти на порядок ниже, чем у штатных пластичных ВВ, минимальная толщина которых составляет 0,3-0,4 мм. Такое ВВ позволяет расширить диапазон воспроизводимых импульсов давления от 10 до 100 Па·с, создать метод воспроизведения механического действия сверхмалых импульсов давления. Однако технология получения такого ВВ и подготовка образцов для испытаний очень сложна.

Рассмотрев изложенные выше методы моделирования механического воздействия на конструкции высокоинтенсивного излучения, перечислив их достоинства и недостатки, можно сформулировать требования к универсальному методу испытаний современной техники на действие РИ: относительная простота, возможность одновременного нагружения поверхностей с большой площадью и испытания в полигонных условиях конструкций сложной формы, обеспечение высокой точности измерения необходимых параметров, защита электрооборудования от воздействия электромагнитных наводок, обеспечение широты диапазона на уровней прикладываемых нагрузок, кратковременность приложения нагрузки. Важнейшими из этих требований являются кратковременность и одновременность.

Для создания механического импульса малой амплитуды и меньшей по сравнению с зарядом пластичного ВВ длительностью на поверхностях большой площади предлагается контактный светодетонирующий заряд, выполненный из тонкого слоя светочувствительного ВВ (СВВ) [1, 12]. Этот способ удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям.

В Сандийской лаборатории еще в 60-70-х годах прошлого века была создана установка LINE (Ligh-Initiated High Explosive) для моделирования импульсного механического воздействия высокоинтенсивного излучения на образцы военной техники [13, 14].

Светочувствительное взрывчатое вещество SASN (ацетиленид-нитрат серебра) напы-

лялось непосредственно на поверхность испытываемой конструкции. Инициирование происходило в результате светового импульса электровзрыва массива тонких вольфрамовых проводников. Работа этой установки усовершенствована и возобновлена в настоящее время [15].

Примеры испытаний на установке LINE приведены на рис. 2. Из отечественных светочувствительных взрывчатых составов известны составы на основе перхлората ртути, перхлората меди и гексаметиленпероксиддиамин [16]. Свойства этих ВВ исследованы с различных сторон и в полной мере и опубликованы. Существуют также работы с описанием возможностей создания на основе СВВ портативных взрывных установок и прежде всего лазерных светодетонаторов [12, 16–17].

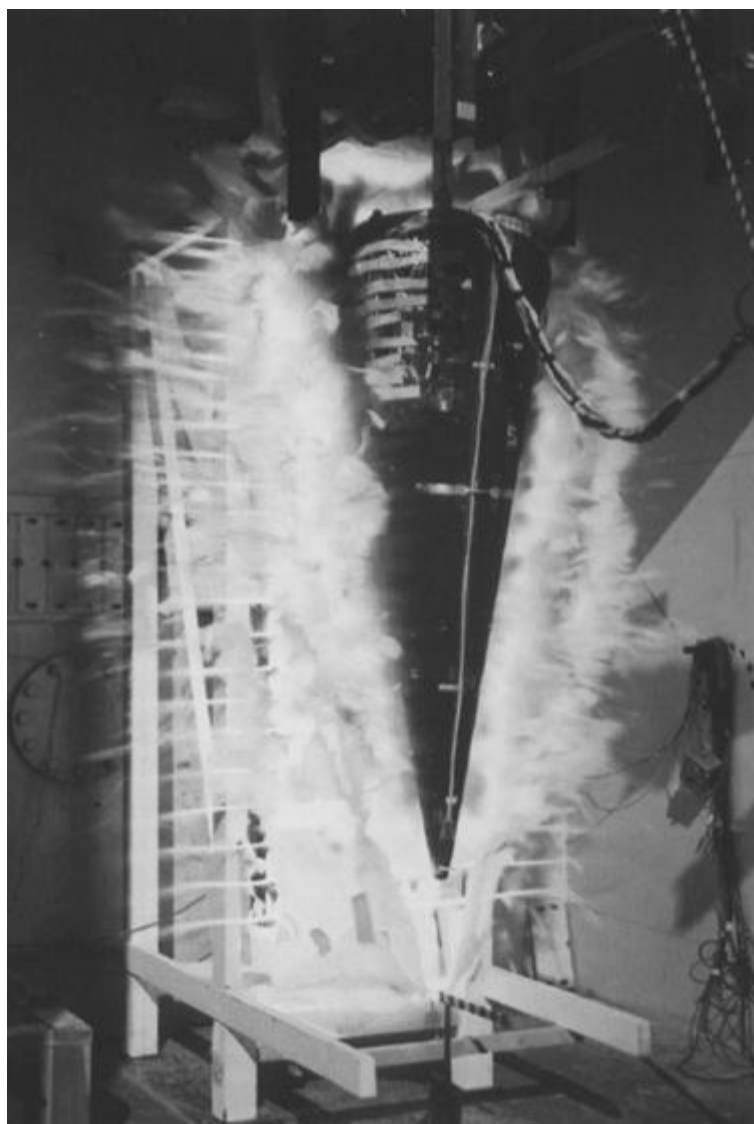


Рис. 2. Проведение испытаний головной части на установке LINE в Сандийской лаборатории

Аномально высокая чувствительность перечисленных ВВ к воздействию мощных источников излучения оптического диапазона (лазеры, импульсные источники света) дает возможность осуществлять испытания натуральных конструкций в полигонных условиях, обеспечивает одновременную детонацию по всей поверхности ВВ на большой площади, обеспечивает низкие уровни импульсного воздействия, короткой длительности.

Для иллюстрации того, насколько сильно влияет способ генерации механического импульса на динамику конструкции, далее приведено численное решение для цилиндриче-

ской оболочки. Рассмотрены два случая приложения нагрузки: последовательное, которое имеет место в методе скользящей детонации при одноточечном инициировании, и одновременное, в случае использования СВВ.

Нагружение осуществляется по образующей линии.

Геометрия задачи показана на рис. 3.

Материал конструкции – сплав АМг6. Характеристики сплава приведены в табл. 1.

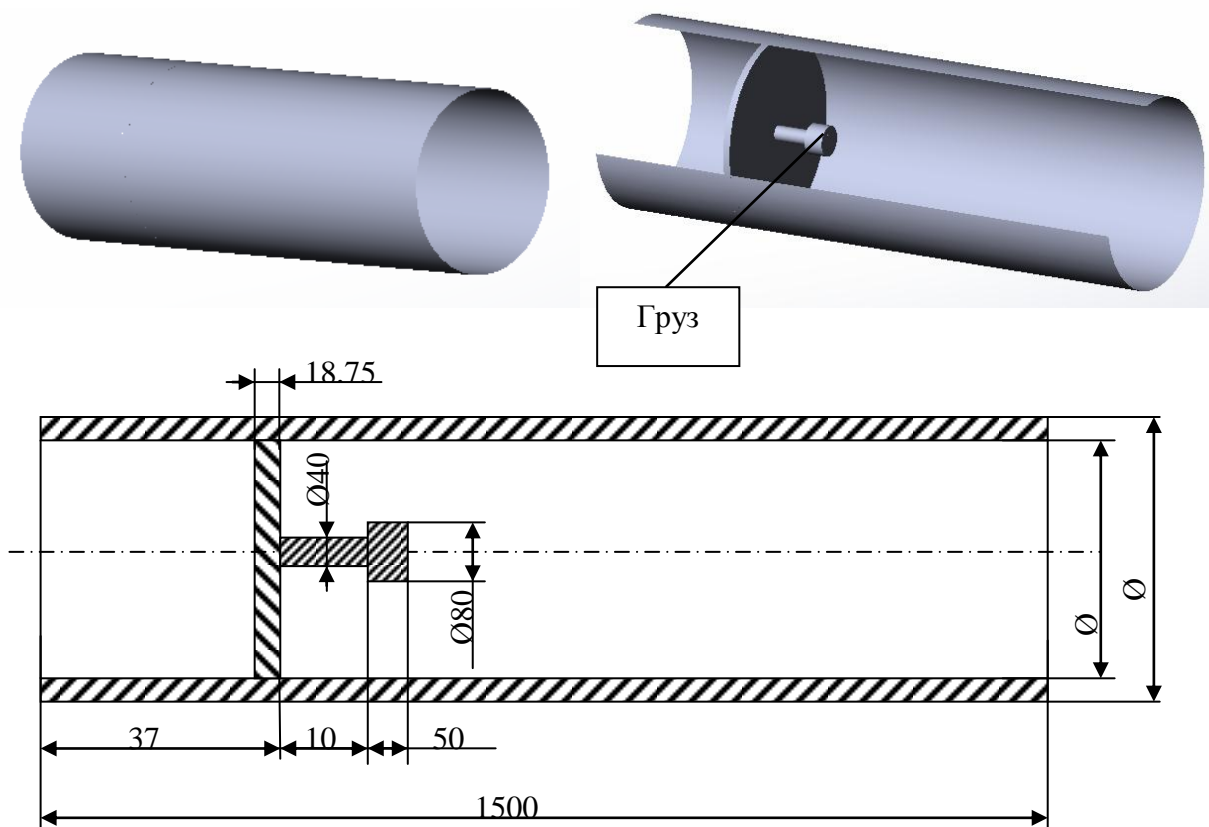


Рис. 3. Геометрия задачи

Таблица 1

Характеристики сплава АМг6

Характеристика	Значение
Плотность, кг/м ³	2700
Модуль упругости, МПа	68000
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, МПа	160

Постановка задачи исследования

Граничные условия - шарнирное закрепление торцов трубы.

Рассматривается два случая приложения нагрузки.

Случай 1

В каждый узел нагрузка в виде сосредоточенной силы прикладывается в определенный момент времени. Приложение нагрузки осуществляется последовательно по линии, как показано на рис. 4. В момент времени $t=0$ прикладывается сила в т. О. Момент времени приложения силы в точках А и А' определяется из соотношения $t = \frac{\Delta X}{D}$, где ΔX - расстояние от

т.О до точек A и A' , D - скорость распространения воздействия. И так для каждой точки последовательно. В задаче принято $D = 6000$ м/с (такая скорость характерна для детонации ВВ). График изменения силы показан на рис. 5.

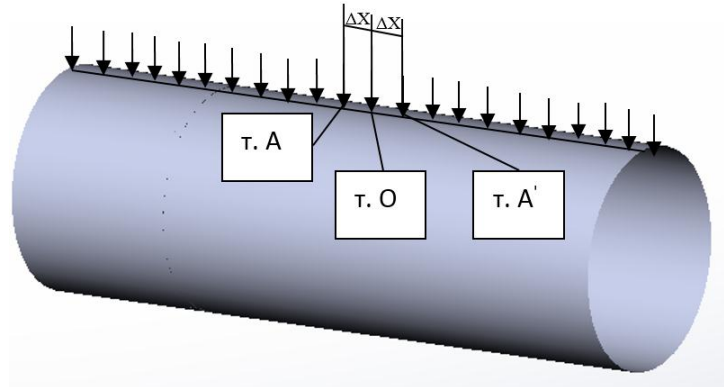


Рис. 4. Оболочечная конструкция, используемая для численного моделирования

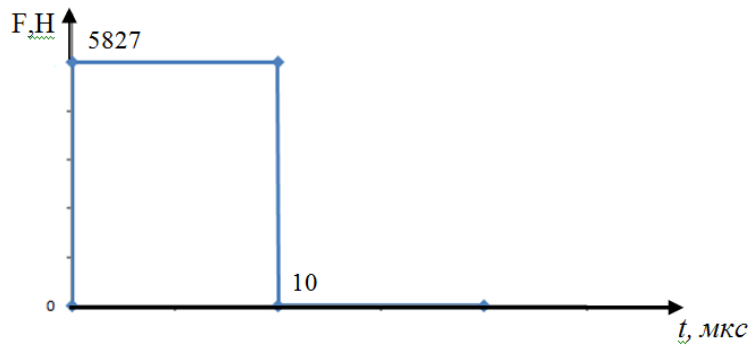


Рис. 5. Зависимость возбуждаемой силы (F, H) от времени ($t, мкс$)

Случай 2

Нагрузка прикладывается в каждый узел вдоль линии одновременно в момент времени $t=0$.

График изменения силы показан на рис. 5.

В результате численного решения задачи получены графики изменения ускорения груза, который показан на рис. 3, во времени. Графики приведены на рис. 6.

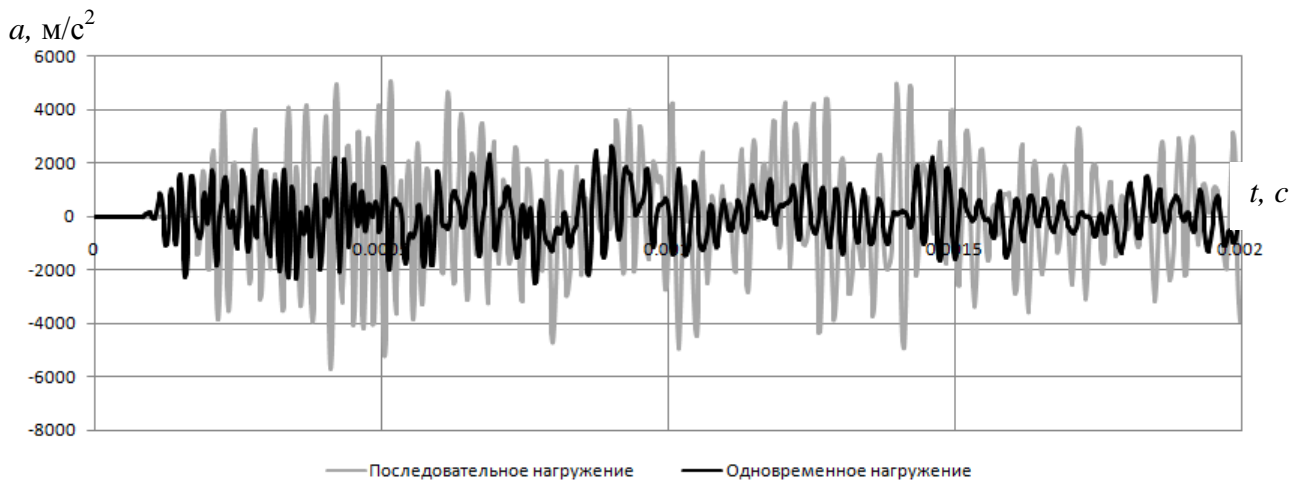


Рис. 6. Зависимость ускорения ($a, м/с^2$) от времени ($t, с$) для разных случаев приложения нагрузки

Черным цветом представлен график изменения ускорения груза в случае одновременного приложения нагрузки, серым - при последовательном приложении нагрузки.

На графиках видно, что уровни ускорений при последовательном приложении силы выше в два раза, чем при одновременном. Это можно объяснить резонансными эффектами, возникающими в оболочке при последовательном приложении нагрузки.

Подводя итог анализа проблемы моделирования механического воздействия РИ на тонкостенные конструкции, можно отметить, что на сегодняшний день существующая экспериментальная база по генерированию механического импульса нуждается в совершенствовании из-за отсутствия устройств низкоимпульсного нагружения, малой длительности и одновременности на больших поверхностях.

Создание универсальной методики и установки возможно с использованием светочувствительных взрывчатых веществ.

Библиографический список

1. Механическое действие рентгеновского излучения на тонкостенные композиционные конструкции / В.Н. Бакулин [и др.]. – М.: Наука, 2008. – 256 с.
2. **Могилев, В.А.** Техника взрывного эксперимента для исследования механической стойкости конструкций / В.А. Могилев, С.А. Новиков, Ю.И. Файков. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2007. – 215 с.
3. **Немчинов, И.В.** Разлет плоского слоя газа при постепенном выделении энергии // ПМТФ. 1961. №1. С. 17–26.
4. **Острик, А.В.** Методы моделирования механического действия излучений на материалы и конструкции / А.В. Острик, В.П. Петровский, А.А. Чепрунов // Научно-техн. сб. № 1 ЦФ-ТИ МО РФ. Сергиев Посад, 1997. – 75 с.
5. Методы динамических расчетов и испытаний тонкостенных конструкций / А.В. Кармишин [и др.]; под ред. А.В. Кармишина. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
6. **Голубев, В.К.** О механическом нагружении преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ / В.К. Голубев [и др.] // ФГВ. 1991. Т.27. №4. С. 94–99.
7. Физика ядерного взрыва. В 5 т. Т. 3. Воспроизведение факторов взрыва/ МО РФ. 12 ЦНИИ. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. – 472 с.
8. **Фисенко, А.К.** Исследование физико-химических и взрывчатых свойств ТЭНа и БТФ в виде тонких слоев, полученных методом термовакуумного напыления / А.К. Фисенко [и др.] / Труды Международной конференции "3 Харитоновские научные чтения". – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. С. 90–93.
9. Los Alamos National Laboratory A. National Resource// LALP 89-49 July 1990. P.10.
10. **Бурцев, В.А.** Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
11. **Демьяновский, С.В.** Формирование профиля нестационарной ударной волны, образованной при электровзрыве плоской металлической фольги / С.В. Демьяновский [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1994. Вып. 2. С. 3–6.
12. **Герасимов, С.И.** Кумулятивные источники света / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков, С.А. Холлин. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. – 327 с.
13. Benham R A. Simulation of X-ray blow-off impulse loading on a reentry vehicle AFT end using light-initiated high explosive. The Shock and Vibration bulletin, 1975. P. 183–189.
14. Nevill G E, Jr, et al. Impulse loading using sprayed silver acetylide-silver nitrate. Experimental mechanics. 1965. 5. P. 294–298.
15. "Let there be LINE". SANDIA LAB News, March 2, 2007.
16. Разработка компонентов высокоэнергетических композиций / М.А. Илюшин [и др.]; под ред. Целинского И.В. – СПбГТИ (ТУ), 2006. – 150 с.

17. Герасимов, С.И. Исследование особенностей инициирования светочувствительными взрывчатыми составами некогерентным излучением / С.И. Герасимов, В.А. Кузьмин // Труды Международной конференции "16 Харитоновские научные чтения". – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2014. С. 90–93.

*Дата поступления
в редакцию 01.07.2014*

S. I. Gerasimov, V. A. Kuzmin

**PROBLEM OF MODELING OF THE MECHANICAL IMPULSE OF X-RADIATION
ON THE THIN-WALLED CONSTRUCTIONS**

Russian Federal Nuclear Center
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

At creation of the modern technique much attention is paid to research of the processes which accompany the impact of high-intensity streams of energy on substance: X-radiation, electromagnetic radiation of optical spectrum, streams of the charged particles. One of the major factors of the X-ray impulse at radiation of any object is mechanical impact on this object. Now, one of the main researching method of behavior of construction's elements for action of a mechanical impulse is carrying out experiments of full-scale exemplars at a nonstationary loading devices, which produce mechanical action of high-intensity radiation. The method of a sliding detonation of thin sheet explosive belongs to one of ways of creation of impulse loading. The numerical decision for a cylindrical shell with amortized mass is given for an illustration how strongly the way of oscillation of a mechanical impulse influences on dynamics of a design. Two cases of the appendix of loading are considered: serial which takes place in a method of a sliding detonation at single-point initiation, and simultaneous, in case of use of photosensitive explosive. On schedules it is visible that levels of accelerations at serial application of force are twice higher, than at the simultaneous. It can be explained with the resonance effects arising in a shell at the serial appendix of loading.

Summing up the result of a case study of model operation of mechanical influence of X-radiation on thin-walled designs, it is possible to tell that today the existing experimental base on generation of a mechanical impulse needs perfecting due to the lack of devices of a low-pulse loading, small duration and simultaneity on larger surfaces.

Creation of the universal methodology and plants can be possible with using photosensitive explosives.

Key words: mechanical impulse, X-radiation, high-level radiation, experimental modeling, explosive, photosensitive explosive.