

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ ТЕХНОГЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА СЛОЖНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Е. И. Краус, И. И. Шабалин

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация*

Столкновения высокоскоростных частиц космического мусора со сложными техническими объектами на орбите могут вызывать как локальные, так и катастрофические повреждения последних, а вторичные фрагменты, обладающие достаточно высокой скоростью, приводят к лавинообразным разрушительным последствиям: разгерметизации труб контура теплоносителя, систем управления и т.д. Моделирование быстротекущих процессов в твердых телах при высоких скоростях встречи требует комплексного подхода к численному инструментарию, а именно к уравнениям баланса массы, импульса и энергии необходимо добавить уравнения состояния и уравнения процесса, реалистично описывающие поведение материалов при экстремальных нагрузках. Далее, многочисленные материалы, составляющие сложные технические объекты, имеют достаточно сильный разброс как по геометрическим, так и весовым характеристикам, что требует достаточно подробной разностной сетки и разумного осреднения свойств материалов. В комплексе программ REACTOR 2D используется симметричный алгоритм расчета контактных границ, а дискретно-континуальный подход обеспечивает возможность решения задач до «конца».

В работе представлен расчет соударения частицы техногенного мусора с космическим аппаратом и показано, что при скоростях 11,7 км/с и выше столкновение приводит к катастрофическим последствиям.

Ключевые слова: сложные технические объекты, аварийные ситуации, космический мусор, удар.

Введение

Аварийные ситуации сложных технических объектов (СТО) на орбите связаны с проблемой техногенного космического мусора [1–3] и весьма актуальны в последнее десятилетие. Столкновения высокоскоростных частиц космического мусора с СТО могут вызывать как локальные, так и глобальные их повреждения. Вторичные частицы, возникающие при разрушении СТО, могут приводить, например, к пробоям труб контура теплоносителя или каналов защиты систем управления СТО. Ниже рассмотрены процессы высокоскоростного воздействия частиц техногенного мусора на СТО и его элементы на примере пробития многослойной разнесенной трубы сплошной и поллой частицей.

Постановка задачи

Следуя [4; 5], будем использовать модель твердого деформируемого тела, которая состоит из уравнений баланса массы, импульса и энергии, а также уравнений состояния и упруго-пластического течения:

$$\dot{x}_i = u_i;$$

уравнение неразрывности среды

$$V_0 \cdot \rho_0 = V \cdot \rho;$$

закон изменения импульса материальной частицы

$$\rho \cdot \dot{u}_i = \sigma_{ij,j};$$

изменение внутренней энергии частицы

$$\rho \cdot \dot{e} = \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}$$

тензор скоростей деформаций имеет вид

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 0,5 \cdot (u_{i,j} + u_{j,i});$$

тензор напряжений представим в общепринятой форме

$$\sigma_{ij} = -\delta_{ij} \cdot P + s_{ij},$$

где s_{ij} – девиатор тензора напряжений, отвечающий за реакцию на сдвиговое формоизменение материальной частицы; δ_{ij} – символ Кронекера; P – функция давления в форме Ми – Грюнайзена.

Уравнения процесса принимаем в форме Прандтля – Рейсса

$$\hat{s}_{ij} + d\lambda' \cdot s_{ij} = 2 \cdot G \cdot \dot{\epsilon}'_{ij}, \quad \dot{\epsilon}'_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{kk} / 3,$$

при условии пластичности Губера – Мизеса

$$s_{ij} \cdot s_{ij} \leq 2 \cdot Y_0^2 / 3,$$

где Y_0 – динамический предел текучести, а для определения скалярного множителя $d\lambda'$ используется известная процедура приведения к кругу текучести. В приведенных выше уравнениях использованы общепринятые обозначения: каждый из индексов i, j пробегает значения 1, 2; по повторяющимся индексам проводится суммирование; точка над символом – производная по времени; индекс после запятой – производная по соответствующей координате; x_i, u_i – компоненты векторов положения и скорости материальной частицы соответственно; ρ – текущая плотность; G – модуль сдвига.

Уравнения в частных производных преобразуются в явную разностную схему на треугольной сетке вдоль траектории каждой материальной частицы (в данном случае – ячейка разностной сетки).

Для учета процессов разрушения система дополняется соотношениями, связывающими параметры напряженно-деформированного состояния с предельными величинами материалов [5; 6]. В качестве уравнения состояния используется термодинамически полное малопараметрическое уравнение состояния [7; 8], которое отличается тем, что практически все параметры можно найти в справочниках по физико-механическим свойствам материалов. Разностная сетка в сложных многосвязных областях строится динамическим способом [9; 10]. Расчет контактных поверхностей между взаимодействующими деформируемыми твердыми телами осуществляется по симметричному алгоритму [11]. Упомянутые выше разработки реализованы в виде комплекса программ REACTOR 2D, позволяющего решать плоские и аксиально-симметричные задачи механики деформируемого твердого тела в широком диапазоне скоростей встречи [12].

Результаты моделирования. Рассмотрим процесс высокоскоростного взаимодействия налетающего тела с модельным сложным техническим объектом.

На рис. 1 представлена геометрическая модель СТО в плоской постановке (момент времени

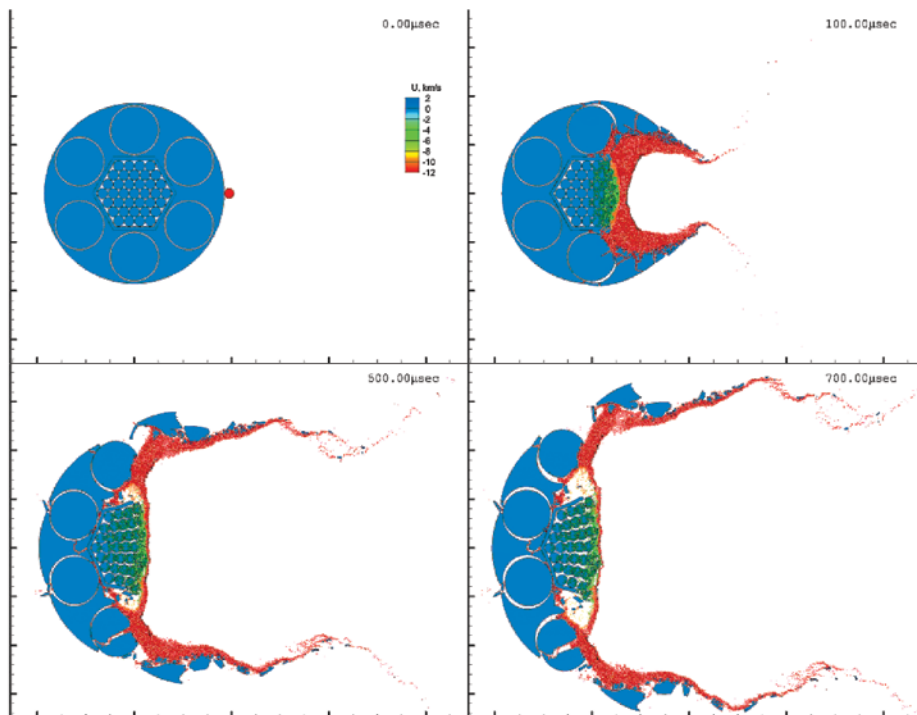


Рис. 1. Кинограмма процесса деформирования и разрушения СТО под действием частицы техногенного космического мусора

$t = 0$ мкс). Состав модельного СТО: бериллиевая оболочка с цилиндрическими вставками из того же материала с малым зазором; шестиугольная стальная камера, наполненная цилиндрическими объектами из UO_2 . На СТО налетает частица диаметром 2 см из алюминия со скоростью 11,7 км/с. От поверхности контакта взаимодействующих тел в обе стороны распространяется сильная волна сжатия. Поскольку волна сжатия на пути распространения встречает границы тел, причем имеющие зазоры, то формируется сложная картина взаимодействий волн нагрузки и разгрузки. Так же образуются волны разгрузки от различных свободных поверхностей, что формирует зоны с растягивающими напряжениями, и при достижении критических значений растягивающих напряжений происходит разрушение материала отрывом.

За фронтом сжимающих напряжений частицы материалов приходят в движение относительно друг друга, т.е. начинается процесс накопления деформаций и при достижении критических значений главных растягивающих и сдвиговых деформаций также происходит разрушение материала. Поскольку область первоначальной встречи налетающего тела и модельного СТО подвержена максимальным нагрузкам, а следовательно, и деформациям, то она получила и максимальное разрушение (рис. 1, момент времени $t = 700$ мкс), причем боковые волны разгрузки разметали фраг-

менты разрушенного материала из этой области в разные стороны от налетающей частицы.

В процессе разрушения СТО высокоскоростной частицей КМ образуются многочисленные фрагменты. Рассмотрим процесс пробития многослойного стального трубопровода сплошной и полый сферическими частицами при скорости столкновения 4,5 км/с.

На рис. 2 приведена кинограмма процесса взаимодействия сплошной алюминиевой сферы диаметром 0,2 см со стальной многослойной, разнесенной трубой (труба в трубе). Диаметры труб – 13,0 см, 11,0 см и 9,0 см. Толщина труб – внешние по 0,05 см, внутренняя – 0,15 см. Зазоры – 1,0 см.

Пробив первую трубу – экран, частица полностью фрагментирована, угол конуса разлета близок к 90 градусам. Центральная часть облака имеет несколько меньшую скорость по отношению к периферии, но содержит самые крупные фрагменты [13]. Центральная часть облака осколков пробивает и вторую трубу, но при этом теряет как свою массу, так и скорость (момент времени $t = 10,0$ мкс). Запреградное облако осколков уже не способно пробить последнюю, более толстую трубу, преодолев примерно две трети ее толщины. В дальнейшем подходящие следом осколки не смогли преодолеть оставшуюся треть толщины внутренней трубы, расчет продолжался до момента времени $t = 80,0$ мкс.

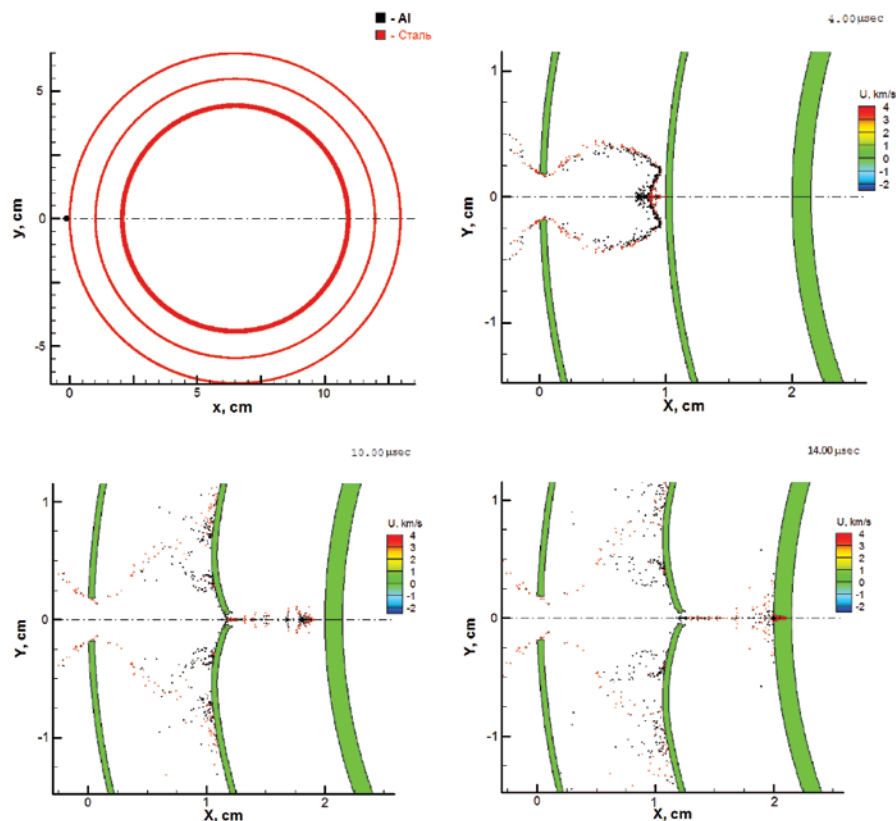


Рис. 2. Временные кадры результатов расчета процесса пробития сплошной алюминиевой сферой многослойной стальной трубы при скорости 4,5 км/с

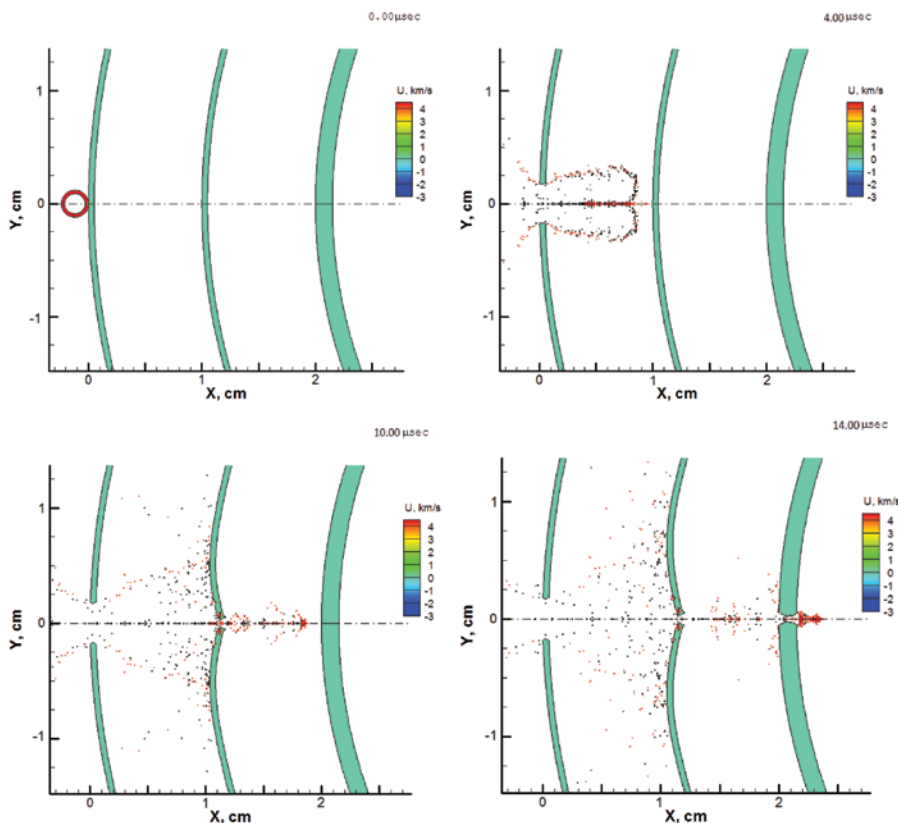


Рис. 3. Кинограмма процесса взаимодействия полой алюминиевой сферы с многослойной стальной трубой

Если взять полую алюминиевую сферу той же массы, как и в предыдущем расчете (диаметр – 0,24 см, толщина стенки – 0,06 см, рис. 3, $t = 0,0$ мкс), то за счет разнесения массы удастся сформировать более устойчивую конфигурацию в центре осколочного облака, причем угол конуса разброса фрагментов примерно 60 градусов (рис. 3, $t = 4,0$ мкс).

Стенка второй трубы отсекает периферию облака осколков, но центральная часть облака за счет большей концентрации фрагментов и меньшей потери скорости пробивает ее (рис. 3, момент времени $t = 10,0$ мкс). В дальнейшем и внутренняя труба оказалась пробита. Таким образом, вторичные полые осколки представляют собой большую опасность для внутренних систем СТО, несмотря на их относительно более низкую скорость.

Список литературы

1. Исследование разрушения космических ядерных энергетических установок в аварийных ситуациях и обоснование систем и средств обеспечения безопасности / П. В. Андреев, В. С. Васильковский, В. В. Кашелкин [и др.] // Известия АлтГУ. 2014. № 1 (81).
2. Моделирование ударных воздействий на конструкцию в проблеме обеспечения безопасности космических ядерных энергетических установок / М. Ю. Федоров, Е. И. Краус, В. М. Фомин [и др.] // Вестник МАИ. 2009. Т. 16, № 3.
3. Назаренко А. И. Проблема «космического мусора» в околоземной среде. Раздел 8. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду : справ. пособие / под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. М., 2000.

Заключение

На основе комплекса программ REACTOR 2D удастся проводить моделирование процессов высокоскоростного нагружения сложных технических объектов, причем численное решение доводится до «конца», т.е. до исчерпания запасов кинетической энергии налетающих частиц космического мусора и разделения СТО на отдельные фрагменты. Рассматривая процессы пробития вторичными осколками, удастся выделить среди них более опасные, способные нанести значительный урон трубопроводам и экранированным трубам систем управления СТО.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00244).

4. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. М. : Мир, 1967. С. 212–263.
5. Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фомин, А. И. Гулидов, Г. А. Сапожников [и др.]. Новосибирск : Издательство СО РАН, 1999. 600 с.
6. Kraus E. I., Shabalin I. I. Impact loading of a space nuclear powerplant // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2013. Vol. 24. P. 138–150.
7. Краус Е. И., Фомин В. М., Шабалин И. И. Модельные уравнения термодинамических функций состояния веществ. 1. Твердое тело // *Физ. мезомех.* 2004. Т. 7. С. 285–288.
8. Fomin V. M., Kraus E. I., Shabalin I. I. An Equation of State for Condensed Matter behind Intense Shockwaves // *Mater. Phys. Mech.* 2004. Vol. 7, N. 1. P. 23–28.
9. Краус Е. И., Фомин В. М., Шабалин И. И. Динамический метод построения треугольных сеток в многосвязных областях // *Вычислительные технологии*. 2009. Т. 14, № 5. С. 40–48.
10. Механика – от дискретного к сплошному / отв. ред. В. М. Фомин ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т теоретической и прикладной механики. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. 316 с.
11. Гулидов А. И., Шабалин И. И. Численная реализация граничных условий в динамических контактных задачах. Новосибирск, 1987. 37 с. Препринт / АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТПМ : № 12-87.
12. Kraus E. I., Shabalin I. I. Reactor2D: A tool for simulation of shock deformation // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1770. P. 030092.
13. Шабалин И. И. Инженерная модель оценки параметров облака осколков за тонким экраном // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности : тр. XVII Межресп. конф. (Новосибирск, 3–5 июля 2001 г.). Новосибирск, 2001. С. 251–256.

IMPACT OF HIGH-VELOCITY TECHNOGENIC DEBRIS ON COMPLEX TECHNICAL OBJECTS AND THEIR ELEMENTS

E. I. Kraus, I. I. Shabalin

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

Collisions of high-speed particles of space debris with complex technical objects in orbit can cause both local and catastrophic damage to the latter, and secondary fragments with high speed enough to lead to a devastating avalanche: depressurization of the coolant circuit pipes, control systems, etc. Modeling of fast processes in solids at high speed impact require a versatile approach at creation of numerical tools, namely, to the mass balance equations, momentum, and energy necessary to add the equation of state and the equation process, realistically describe the behavior of materials under extreme loads. In addition, numerous materials, constituent complex technical objects have a strong enough scatter, both geometric and weight parameters, which requires a sufficiently detailed difference grid and reasonable averaging properties of materials. In the software REACTOR 2D used symmetric algorithm of calculating contact boundaries and discrete-continuous approach provides the ability complete solution of a problem.

This paper presents a spacecraft with a particle collision calculation of technogenic debris and showed that 11.7 km/s and more at speeds collision leads to catastrophic consequences.

Key words: complex technical objects, accident situations, space debris, impact

References

1. Issledovanie razrusheniya kosmicheskikh jadernyh jenergeticheskikh ustanovok v avariynih situacijah i obosnovanie sistem i sredstv obespechenija bezopasnosti / P. V. Andreev, V. S. Vasil'kovskij, V. V. Kashelkin [et. al.] // *Izvestija AltGU*. 2014. № 1 (81). (In Russ.)
2. Modelirovanie udarnyh vozdeystvij na konstrukciju v probleme obespechenija bezopasnosti kosmicheskikh jadernyh jenergeticheskikh ustanovok / M. Ju. Fedorov, E. I. Kraus, V. M. Fomin [et. al.] // *Vestnik MAI*. 2009. Т. 16, № 3. (In Russ.)
3. Nazarenko A. I. Problema «kosmicheskogo musora» v okolozemnoj srede. Razdel 8. Jekologicheskie problemy i riski vozdeystvij raketno-kosmicheskoy tehniky na okruzhajushhuyu sredyu: sprav. posobie / eds. V. V. Adushkina, S. I. Kozlova, A. V. Petrova. M., 2000. (In Russ.)
4. Wilkins M. Calculation of Elastic–Plastic Flow / *Methods in Computational Physics*. Academic. New York, 1964. Vol. 3. P. 211–263.

5. Vysokoskorostnoe vzaimodejstvie tel / V. M. Fomin, A. I. Gulidov, G. A. Sapozhnikov [et. al.]. Novosibirsk : Izdatel'stvo SO RAN, 1999. 600 p. (In Russ.)
6. Kraus E. I., Shabalin I. I. Impact loading of a space nuclear powerplant // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2013. Vol. 24. P. 138–150.
7. Kraus E. I., Fomin V. M., Shabalin I. I. Model'nye uravnenija termodinamicheskikh funkcij sostojanija veshhestv. 1. Tverdoe telo // *Fiz. mezomeh.* 2004. T. 7. P. 285–288.
8. Fomin V. M., Kraus E. I., Shabalin I. I. An Equation of State for Condensed Matter behind Intense Shockwaves // *Mater. Phys. Mech.* 2004. Vol. 7, N. 1. P. 23–28.
9. Kraus E. I., Fomin V. M., Shabalin I. I. Dinamicheskij metod postroenija treugol'nyh setok v mnogosvjaznyh oblastjah // *Vych. tehnologii*. 2009. T. 14, № 5. P. 40–48.
10. *Mehanika – ot diskretnogo k sploshnomu* / ed. V. M. Fomin; Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t teoreticheskij i prikladnoj mehaniki. Novosibirsk : Izd-vo SO RAN, 2008. 316 p. (In Russ.)
11. Gulidov A. I., Shabalin I. I. Chislennaja realizacija granichnyh uslovij v dinamicheskikh kontaktnyh zadachah. Novosibirsk, 1987. 37 p. Preprint / AN SSSR. Sib. otd-nie. ITPM : N 12-87. (In Russ.)
12. Kraus E. I., Shabalin I. I. Reactor2D: A tool for simulation of shock deformation // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1770. P. 030092.
13. Shabalin I. I. Inzhenernaja model' ocenki parametrov oblaka oskolokov za tonkim jekranom // *Chislennye metody reshenija zadach teorii uprugosti i plastichnosti* : tr. XVII Mezhresp. konf. (Novosibirsk, 3–5 July 2001). Novosibirsk, 2001. P. 251–256. (In Russ.)