

*Е.И. Краус, В.М. Фомин, И.И. Шабалин*

## Динамические контактные задачи на примере модельной космической ядерной энергетической установки в двумерной постановке

*E.I. Kraus, V.M. Fomin, I.I. Shabalin*

## 2D Dynamic Contact Problems on the Example of a Model Space Nuclear Power Plant

В работе приведены численные решения задач о разрушении конструкции модельного реактора ядерной космической энергетической установки: 1) при его аварийном падении на Землю (скорость соударения до 400 м/с); 2) при столкновении на орбите с фрагментами космического мусора (скорость соударения до 16 км/с).

**Ключевые слова:** ударные волны, высокоскоростное взаимодействие.

В аварийных ситуациях современные космические аппараты с термоэмиссионными преобразователями «отстреливают» ядерную энергетическую установку. Однако существует определенная вероятность того, что часть реактора, содержащая ядерное топливо, несмотря на значительные тепловые и механические нагрузки при прохождении плотных слоев атмосферы, может достичь поверхности Земли. Причем из-за разнообразия земной поверхности блок может встретить на своем пути как водную поверхность, так и горные породы или мягкие грунты.

Несмотря на современный уровень развития вычислительной техники и наличие достаточно адекватных математических моделей поведения материалов, решение задач удара реальных технических объектов получить практически невозможно. Это обусловлено сложностью пространственного распо-

ложения деталей и наличием многих масштабов. В таких случаях используется метод упрощения объектов с помощью построения ряда моделей для исследования влияния параметров удара на конкретные детали объекта [1]. В нашем случае внутри реакторной зоны проведено осреднение материалов мелкомасштабных деталей в аддитивном приближении [2, 3], поскольку масса многих материалов реактора достаточно мала (материалы: бериллий, диоксид урана и гидрид циркония, составляют 95–97% массы реактора), чтобы оказать существенное влияние на амплитуду ударной волны. Далее считается, что при входе в плотные слои атмосферы внешние элементы конструкции ядерной энергетической установки сгорают, а остается объект со сложным внутренним строением (модельный реактор), показанным на рисунке 1.

**Key words:** shock waves; high-velocity impact.

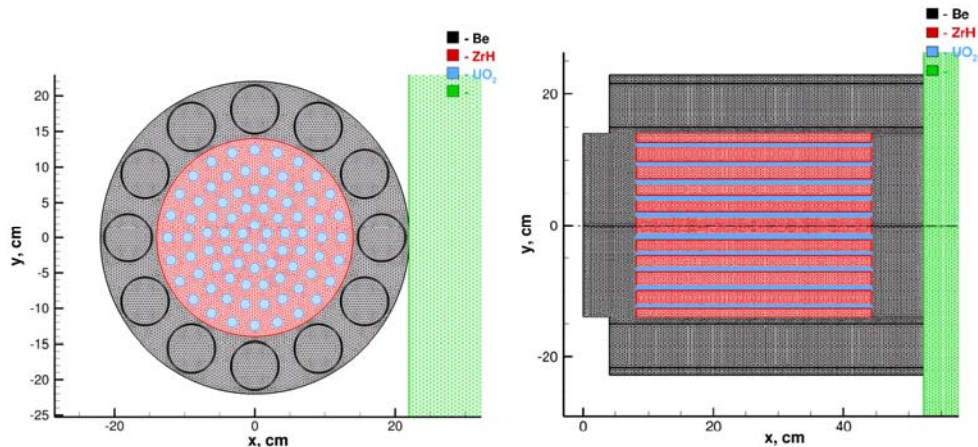


Рис. 1. Модели реактора в плоской и аксиальной конфигурации

Были рассмотрены две задачи о боковом и торцевом (продольном) ударах реактора о поверхность преграды. В первом случае задача характеризуется наличием многосвязной расчетной области с большим количеством контактных поверхностей. Во втором случае модель реактора сформирована в виде кольцевой структуры – счетная область также обла-

дает многосвязностью и обилием контактных поверхностей.

**Процесс разрушения конструкции реактора при падении на поверхность Земли. Низкоскоростной удар.** Пусть реактор взаимодействует с поверхностью песчаника на скорости 400 м/с в плоской и аксиальной постановках (рис. 2).

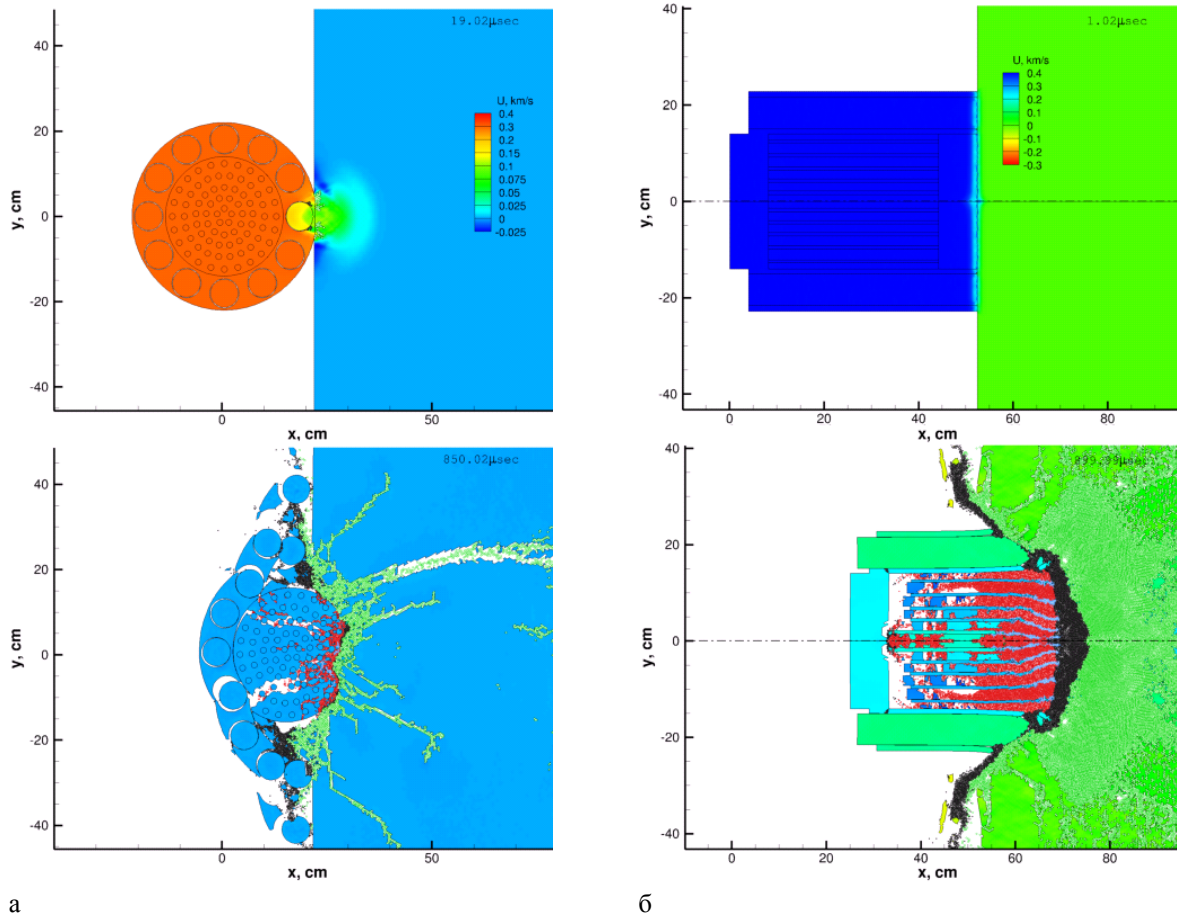


Рис. 2. Столкновение реактора с песчаником

Повреждение песчаника начинается на стадии сжатия. На периферии области контакта сдвиговые деформации ослабляют данную зону и формируют «клин», направленный в сторону налетающего реактора. «Клин» тормозит область вблизи контакта, создает сдвиговые деформации в бериллиевой оболочке реактора, заставляя обтекать возникшее препятствие. Одновременно идет деформирование области заливки из гидрида циркония, причем в центральной части действуют растягивающие напряжения, возникающие в зоне встречи двух волн разгрузки, приводящие к растрескиванию заливки из гидрида циркония.

В дальнейшем усиливаются процессы разрушения песчаного блока, что приводит к некоторой разгрузке бериллиевой оболочки и образованию зоны сплошного разрушения песчаника, его уплотнению и соответственно формированию однородной «подушки», воспринимающей оболочку на достаточно

большой площади. Данный этап приводит к интенсивному развитию трещин сдвига, формированию макрофрагментов оболочки и дальнейшему растрескиванию заливки. Твэлы практически не разрушаются, поскольку заливка из гидрида циркония растрескивается и не оказывает значительного воздействия на них. Далее процесс идет в квазистатическом режиме. На момент времени 850 мкс цилиндры из бериллия, не подверженные прямому контакту, не фрагментируются и практически в целом состоянии покидают зону разрушения (рис. 2а).

Начальная стадия торцевого удара характеризуется интенсивным образованием волн сжатия и волн разгрузки сжатия, интерференция которых дает сдвиговые напряжения и соответственно сдвиговые деформации (рис. 2б). Далее в квазистатическом режиме сжатие головной части реактора приводит к формированию радиального течения материалов реактора в сторону боковых свободных поверхностей

и разрушению материала заливки. Кольцевые твэлы начинают изгибаться, что в дальнейшем приводит к их разрушению. Фрагменты разрушенного песчаника уплотняются и начинают радиальное течение из зоны под головной частью реактора, выносящее их в сторону свободной поверхности, т.е. идет формирование кратера. Движение волн сжатия и возникающих волн растяжения в сложной среде с многочисленными границами приводит к хаотическому разрушению малопрочных материалов реактора. Кольцевые цилиндры из бериллия очень быстро тормозятся и «выходят» из бериллиевой оболочки, при этом более тяжелые урановые твэлы продолжают двигаться в начальном направлении и разрушаться под действием нагрузки.

**Удар частиц космического мусора по конструкции реактора. Высокоскоростной удар.** Пусть стальная частица объектом диаметром 3 см со скоростью 12 км/с (наиболее вероятная скорость встречи) налетает на реактор с защитой Уиппла (алюминиевый лист, окружающий реактор со всех сторон, толщиной 2 мм).

От поверхности контакта защиты и частицы распространяются сильные ударные волны, отражающиеся от свободных поверхностей волнами разгрузки, интерференция которых и порождает волны растяжений большой амплитуды, которые значительно превосходят прочностные характеристики материалов. Это приводит к дроблению материалов и формированию запреградного облака осколков [5].

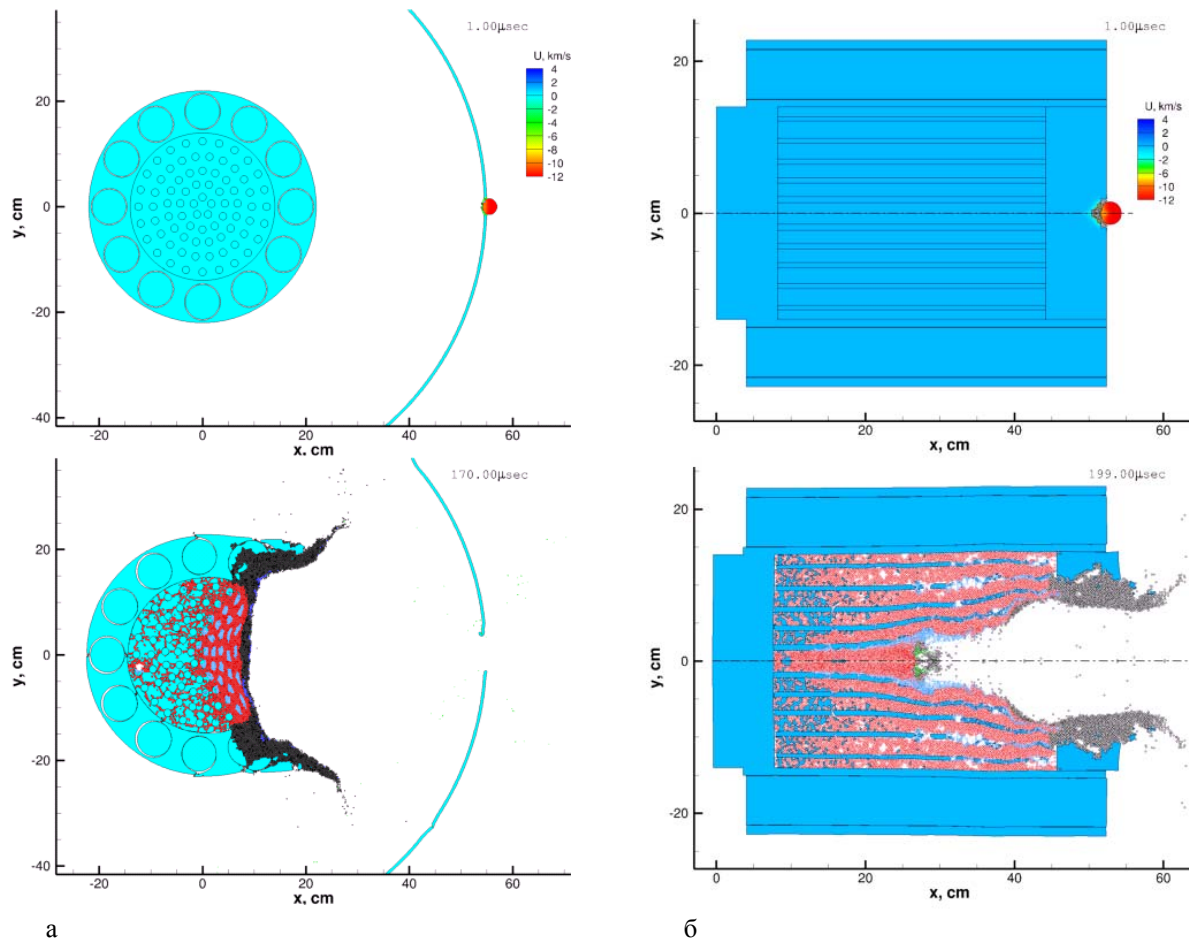


Рис. 3. Кинограмма процесса столкновения реактора с частицей космического мусора

Облако частиц разрушенного ударника, практически с начальной скоростью соударения, достигая бериллиевой оболочки реактора, причем, несмотря на наличие защиты Уиппла, кинетической энергии облака частиц достаточно для разрушения оболочки из бериллия. Поток многочисленных запреградных частиц формирует устойчивую ударную волну, ускоряющую материал реактора, что приводит к формированию кратера и разрушению не только оболочки из бериллия, но и заливки из гидрида циркония, а также урановых твэлов (рис. 3а).

Рассмотрим процесс взаимодействия реактора со стальной частицей диаметром 3 см на скорости 12 км/с, налетающей по его оси (рис. 3б). От поверхности контакта распространяется мощная ударная волна сферической формы. Наличие свободных поверхностей на периферии взаимодействующих тел позволяет материалам тел разгружаться и приобретать скорость, направленную от «центра давления», что формирует области растягивающих деформаций и напряжений. Начинается процесс разрушения. Так как центральная область реактора

имеет сложное строение, то множественное взаимодействие волн сжатие–разгрузка приводит к его разрушению даже на стадии общего сжатия за фронтом ударной волны (в основном из-за сдвиговых деформаций). Приобретенная скорость, направленная от «центра давления», приводит к систематическим растягивающим деформациям, которые достаточно быстро достигают предельных значений, и фрагментации материалов центральной части реактора. Массовая дефрагментация центральной

части существенно снижает нагрузки на периферии, что позволяет оболочке из бериллия оставаться в неразрушенном состоянии.

**Выводы.** Построен инструментарий, позволяющий описывать процессы в сложных технических объектах и дающий возможность просчитывать различные сценарии падения реактора на поверхность Земли, а также оценивать последствия встречи космических аппаратов с орбитальными частицами техногенного мусора.

### Библиографический список

1. Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Динамический метод построения треугольных сеток в многосвязных областях // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, №5.
2. Дремин А.Н., Карпухин И.А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ. – 1960. – №3.
3. Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Учет электронных составляющих в уравнении состояния при рас-
- чете ударных волн в смеси металлов // Математическое моделирование систем и процессов. – 2001. – №9.
4. Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Моделирование процесса соударения сложных двумерных тел о деформируемую преграду // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11.
5. 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, 2001.