

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОНСТРУКЦИЮ В ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЯЭУ

Михаил Юрьевич ФЕДОРОВ родился в 1954 г. в городе Москве. Старший научный сотрудник ФГУП «Красная Звезда». Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области прочности ядерных энергоустановок, методов и средств обеспечения безопасности космических ЯЭУ. Автор 42 научных работ. E-mail: re.entry@g23relcom.ru

Michael Yu. FEDOROV, Ph.D., was born in 1954, in Moscow. He is a Senior Research Associate at the Federal State Unitary Establishment «Krasnaya Zvezda». His major research interests are in nuclear power plant strength, techniques to ensure safety of space nuclear power systems. He has published 42 technical papers. E-mail: re.entry@g23relcom.ru

Евгений Иванович КРАУС родился в 1973 г. в городе Прокопьевске Кемеровской области. Старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Кандидат физико-математических наук. Основные научные интересы — в области построения термодинамических уравнений состояния материалов в области высоких давлений и температур и применения их в задачах соударения твердых тел, компьютерного моделирования нестационарных процессов в упруго-пластическом приближении. Автор 37 научных работ. E-mail: kraus@itam.nsc.ru

Eugene I. KRAUS, Ph.D., was born in 1973, in the Kemerovo Region. He is a Senior Research Associate at the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics in the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (SB RAS). His major research interests are in thermodynamic equations for substance states under high pressure and temperature values in regard to impact problems for rigid bodies as well as in computer simulation of non-steady processes basing on elastic-plastic approximation. He has published 37 technical papers. E-mail: kraus@itam.nsc.ru

Василий Михайлович ФОМИН родился в 1940 г. в городе Казани. Заместитель председателя СО РАН. Директор Института теоретической и прикладной механики. Академик РАН. Основные научные интересы — в области построения физико-математических моделей ударно-волновых процессов, исследований взаимодействия продуктов детонации взрывчатых веществ с конденсированными средами, исследований гетерогенных течений смесей в проблемах аэродинамики. Автор более 600 научных работ. E-mail: fomin@itam.nsc.ru

Vassily M. FOMIN, D.Sci., a Member of the Russian Academy of Sciences, was born in 1940, in Kazan. He is a Vice Chairman at the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences as well as the Director at the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics. His major research interests are in physical and mathematical modeling of shock-wave processes for high-velocity impacts, interaction between products of explosive detonation and condensed matters, heterogeneous mixture flows in regard to aerodynamic problems. He has published more than 600 technical papers. E-mail: fomin@itam.nsc.ru

Иван Иванович ШАБАЛИН родился в 1952 г. в городе Киселевске Кемеровской области. Заместитель начальника отдела СО РАН. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области численного моделирования динамических процессов в упруго-пластических средах, разработки алгоритмов для решения задач разрушения сложных технических объектов при ударе. Автор 58 научных работ. E-mail: shabalin@sbras.nsc.ru

Ivan I. SHABALIN, Ph.D., was born in 1952, in the Kemerovo Region. He is currently the Deputy Head of a Department in the Research Management Division at the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His major research interests are in numerical simulation for dynamic processes in elastic-plastic mediums as well as in development of techniques to solve problems related to shock-caused destruction of complex engineering objects. He has published 58 technical papers. E-mail: shabalin@sbras.nsc.ru

*В рамках исследований по обеспечению безопасности космических ЯЭУ рассматриваются направления работ по созданию методик прогнозирования последствий аварийных ситуаций, связанных с ударным воздействием на конструкцию ЯЭУ, определяется ряд связанных между собой задач, решение которых в итоге позволяет выполнять оценки возможных радиационных последствий для природы и населения. Приведены результаты расчетов разрушения реактора космической ЯЭУ при высокоскоростном ударе космическим мусором в одномерной постановке и при падении на поверхность Земли.*

*Some approaches are considered to ensure safety for space nuclear power systems. These approaches are related to development of forecasting techniques for accident radiation consequences caused by impacts on structure of space nuclear power systems. Several interrelated problems are generated with solutions, which make it possible to reveal radiation consequences for the nature and population. Computation results are presented to describe destruction analysis problem for the nuclear reactor of space nuclear power system. The destruction is caused with a high velocity impact by space debris as well as with impact because of fall on the Earth surface.*

**Ключевые слова:** удар, аварийные ситуации, космические ядерные энергетические установки, реактор, космический мусор, радиационные последствия.

**Key words:** impact, accident situations, space nuclear power systems, nuclear reactor, space debris, radiation consequences.

Возможность использования ядерной энергии для решения задач освоения космического пространства во многом определяется реализацией методов и средств обеспечения безопасности космических ЯЭУ.

В методах и средствах обеспечения безопасности КЯЭУ значительное место занимают методики прогнозирования последствий аварийных ситуаций, связанных с ударными воздействиями на конструкцию, результатом которых может быть выход радиоактивных веществ в окружающую среду.

Активные теоретические исследования и моделирование удара по конструкции КЯЭУ обусловила проблема космического мусора (КМ) [1].

Начиная с 1991 г. данные исследования проводятся ФГУП «Красная Звезда» при методическом обеспечении и в тесном сотрудничестве с Институтом теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН (ИТПМ СО РАН).

В настоящих исследованиях определен ряд связанных между собой задач, решение которых позволяет оценить возможные последствия ударного воздействия на конструкцию КЯЭУ и космического аппарата (КА), а затем определить комплекс мероприятий различного рода по предупреждению и минимизации радиационного воздействия на природу и население.

### Анализ ударных воздействий

Данный анализ проводится по ряду параметров.

**А. По скорости удара.** В зависимости от скорости в средах и твердых телах протекают физические процессы, которые в зависимости от скорости удара описываются или различными уравнениями, или в этих уравнениях удерживается разное количество членов, или используются различные по величине константы. В источнике [2] рекомендуется следующая классификация по скорости удара:

*низкие скорости*  $M_0 \ll 1$ , где  $M_0 = v_0/c_0$ ,  $v_0$  — скорость соударения,  $c_0$  — скорость звука в материале. Для низких скоростей характерны деформации среды в пределах упругости;

*средние скорости*  $M_0 \leq 0,75$  — характеризуются нелинейной связью между тензорами напряжений и деформаций в материале;

*высокие скорости*  $M_0 > 0,75$ . В области высоких скоростей наблюдается существенное отклонение от линейного закона сжимаемости и возникают области фазовых переходов.

**Б. Анализ по степени и типу механического повреждения.** Позволяет получить пороговые характеристики ударников, в частности характеристики частиц и фрагментов КМ.

Можно определить три степени, три типа повреждения объекта:

— катастрофическое повреждение, когда в осколки переходит свыше 10% массы мишени (общепринятый критерий);

— локальное, когда разрушается менее 10% массы объекта и в целом сохраняется его геометрия;

— пробой — образование сквозного отверстия или глубокого кратера.

**В. По объектам соударения следует различать: метеоры, КМ, поверхность Земли.** Метеоры обладают скоростями до десятков километров в секунду, плотности каменных метеоров, которых подавляющее большинство, порядка плотности алюминия. КМ — скорости соударения до 16 км/с, плотности  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup> — алюминий,  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup> — сталь. Поверхность Земли, например вода, гранит, песок, скорость соударения до 400 м/с.

**Г. По степени радиационной опасности.** Чтобы оценить радиационные последствия, необходимо рассматривать сценарии аварийных ситуаций с КЯЭУ. Например, локальные повреждения КЯЭУ и КА могут в итоге привести к более серьезным последствиям, чем катастрофические повреждения. На радиационные последствия в значительной степени влияет процесс спуска фрагментов реактора в атмосферу.

### Анализ сценариев аварийных ситуаций с КЯЭУ и КА

Рассмотрим наиболее характерные сценарии.

Падение частично обгоревшего реактора на поверхность Земли может быть вызвано попаданием крупных (характерным размером порядка 10 см) фрагментов в массивные части ЯЭУ, ее торможением и сходом с орбиты. Радиационные последствия такого сценария зависят от количества радиации, которое успел наработать реактор.

Повреждение типа пробой или локальное повреждение системы управления КА на промежуточной орбите, когда реактор уже начал работать, но перелет на высокую безопасную орбиту уже невозможен и в конце концов произойдет спуск «невысвеченного» реактора.

Катастрофические повреждения реактора космическим мусором с образованием радиоактивных фрагментов, обладающих тормозным импульсом.

Возможны и другие сценарии.

### Разработка физико-математических моделей процессов удара, алгоритмов и программ

Закономерности протекания ударно-волновых процессов в сплошных однородных средах изучены достаточно хорошо. Имеются и физические

модели процессов и эффективные численные методы расчета [2].

Задача предельно усложняется, если рассматриваются ударные явления и их последствия на разветвленной конструкции (многосвязной области), состоящей из пластин, оболочек, стержней, трехмерных тел из разнородных материалов с множественными контактными границами. Кроме того, в конструкции применяются реакторные материалы, для которых не удастся найти значения констант, требующихся для ряда известных форм уравнений состояния. Такие константы определяются экспериментальным путем.

Поэтому работа ведется как по поиску эффективного алгоритма расчета сложных составных объектов, так и по конструированию широкодиапазонных уравнений состояния твердого тела, пригодных для описания реакторных материалов, в первую очередь двуокиси урана.

### Разработка моделей конструкции КЯЭУ и ее реактора

Методические разработки по расчету ударного воздействия сопровождаются созданием моделей конструкции, которые, с одной стороны, должны отражать некий набор существенных признаков конструкции, а с другой — должны удовлетворять принятым методикам расчета. По мере совершенствования расчетных методов будут усложняться и модели конструкции в сторону приближения к оригиналу. Возможен и обратный процесс: чтобы посчитать, может потребоваться упростить модель до уровня, который может быть воспринят разработанным алгоритмом и программой.

### Выбор способов повышения «живучести» и безопасности КЯЭУ

В выборе способов повышения «живучести» и безопасности КЯЭУ по отношению к ударному воздействию следует рассматривать технические, технологические и другие способы.

Технические способы:

- постановка защитных экранов над поверхностями уязвимых, жизненно важных элементов конструкции КЯЭУ, например коллекторов холодильника-излучателя;

- модульная структура КЯЭУ, когда вся установка собирается из автономных модулей и выход из строя определенного количества модулей парируется системой управления так, что установка продолжает выполнять свои функции.

Технологические способы — это выбор экранящих материалов и покрытий, обладающих жаростойкостью и малым удельным весом.

К другим способам относится выбор промежуточных и рабочих орбит КА с КЯЭУ с минимальной концентрацией КМ.

За период с 1991 по 2000 г. завершены исследования последствий столкновения реакторов КЯЭУ первого поколения с КМ в одномерной постановке, получены данные по спектрам размеров и скоростям осколков (фрагментов) при катастрофических разрушениях, которые затем передавались для баллистических, аэродинамических и тепловых расчетов. Результатом этой категории расчетов является прогноз радиационной обстановки на поверхности Земли, степень опасности для природы и населения.

Для подсчета количества осколков предложена методика, в которой рассчитанная толщина отколовшегося слоя приписывается трем измерениям осколка, а относительный объем осколков каждой размерной группы подсчитывается по формуле

$$\bar{V} = \frac{N_1 \cdot n_1 + N_2 \cdot n_2 + \dots + N_n \cdot n_n}{N_\Sigma}, \quad (1)$$

где  $N_i$  — количество расчетных ячеек в слое;  $n_i$  — число слоев одной длины (толщины), измеряемой числом ячеек;  $N_\Sigma$  — количество ячеек в модели.

Количество осколков каждой размерной группы

$$N = \sum_j \sum_i \frac{V_{\text{яч}} N_i n_i}{(N_i l_{\text{яч}})^3}, \quad (2)$$

где  $j$  — количество слоев в размерной группе, отличающейся количеством ячеек;  $V_{\text{яч}}$  — объем ячейки;  $l_{\text{яч}}$  — длина ячейки.

Математическое ожидание количества осколков каждой размерной группы на базе  $K$  экспериментов

$$M(N) = \sum_K \sum_j \sum_i \frac{V_i N_i n_i}{(N_i l_i)^3} / K. \quad (3)$$

В результате такой обработки получено близкое к нормальному закону распределение осколков реактора установки «Тополь» по размерам (рис. 1).

Химический состав осколков принимается в соответствии с объемными долями веществ в реакторе.

На основе расчетов разрушения реактора предложен анализ КМ по кривым граничного размера в координатах размер ударника — скорость соударения. На рис. 2 показаны такие кривые для реактора КЯЭУ «Бук». Выше каждой кривой в оскол-

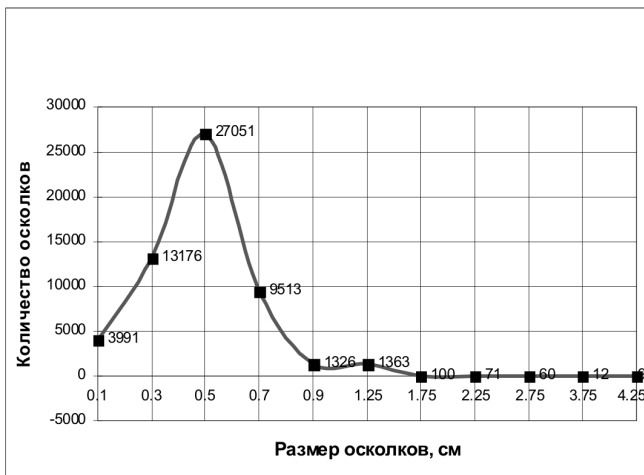


Рис. 1. Распределение осколков реактора «Тополь»

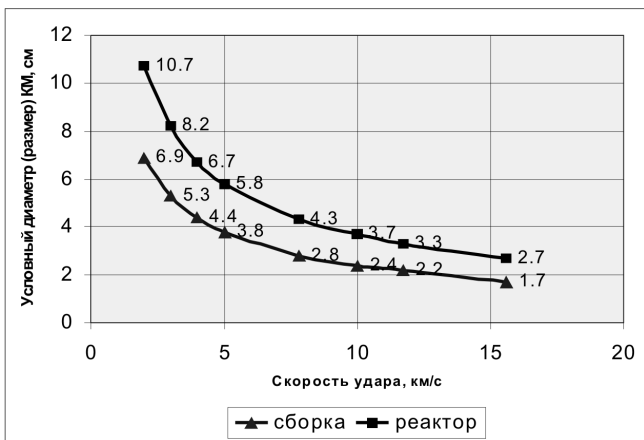


Рис. 2. Кривые граничного размера КМ

ки переходит более 10% массы соответствующего объекта, ниже — менее 10%.

Такая методика анализа обладает наглядностью, может быть применена к любым типам повреждений (с использованием соответствующих расчетных соотношений) и к расчету любых элементов конструкции.

С 2001 г. усилия сосредоточены на реализации двумерной 2D-постановки для задачи ударного разрушения конструкции реактора КЯЭУ. В отличие от одномерной постановки 2D-постановка с учетом симметрии объекта для осевого и бокового удара уже описывает движение осколков в пространстве, хотя и не может охватить всех случаев, как это способно реализовать трехмерное приближение. Для 2D-постановки создана коаксиальная модель частично обгоревшего реактора (рис. 3) (критерий моделирования — сохранение равенства объемов материалов активной зоны) и определены схемы удара, которые можно обсчитать в 2D-постановке (рис. 4).

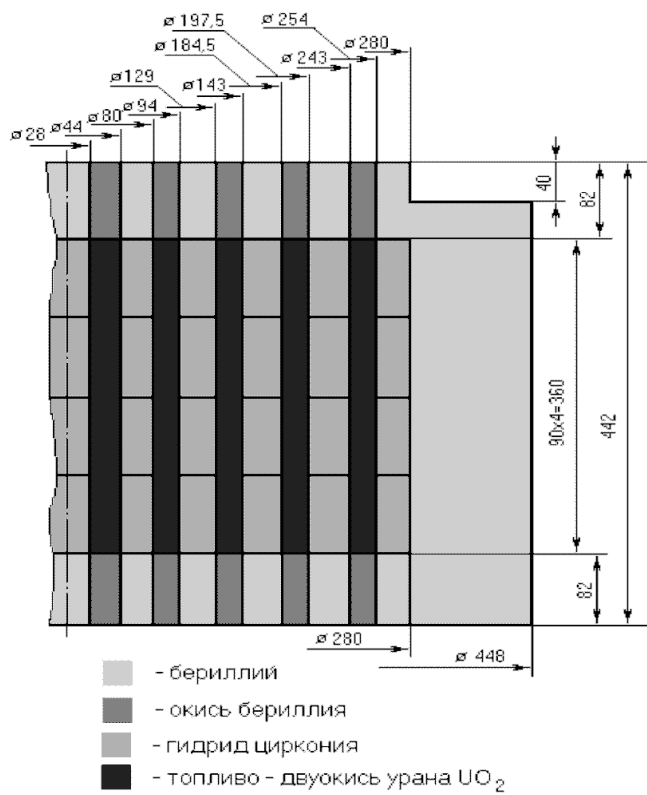


Рис. 3. Коаксиальная 2D-модель реактора «Тополь»

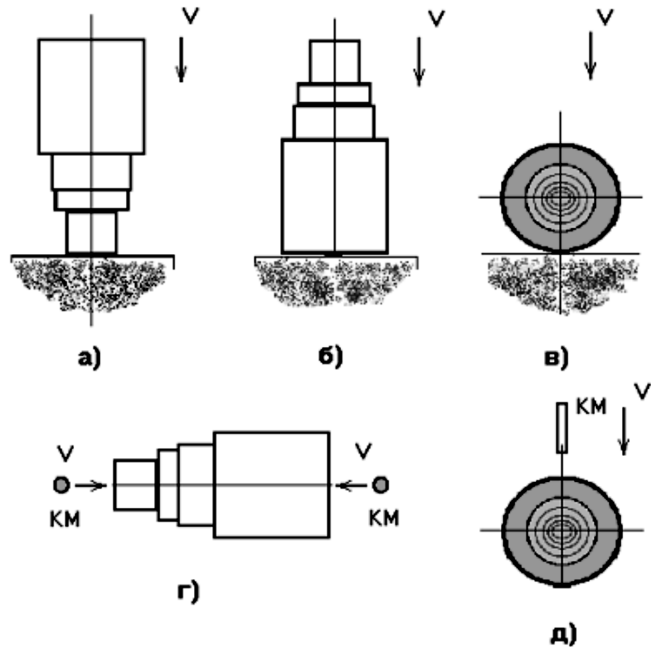


Рис. 4. 2D-расчетные варианты ударного воздействия на реактор:

- а, б — осевой удар о поверхность;
- в — боковой удар о поверхность;
- г — осевое столкновение с КМ;
- д — боковое столкновение с КМ

По 2D-программе получены результаты по расчету удара реактора «Тополь» о поверхности (гранит, песок, вода) со скоростью 400 м/с. Резуль-

тат удара о гранит приведен на рис. 5. К моменту остановки внутренние элементы реактора разрушаются полностью, и нарушается целостность бериллиево-оболочки, что может привести к выходу радиоактивных веществ в окружающую среду.

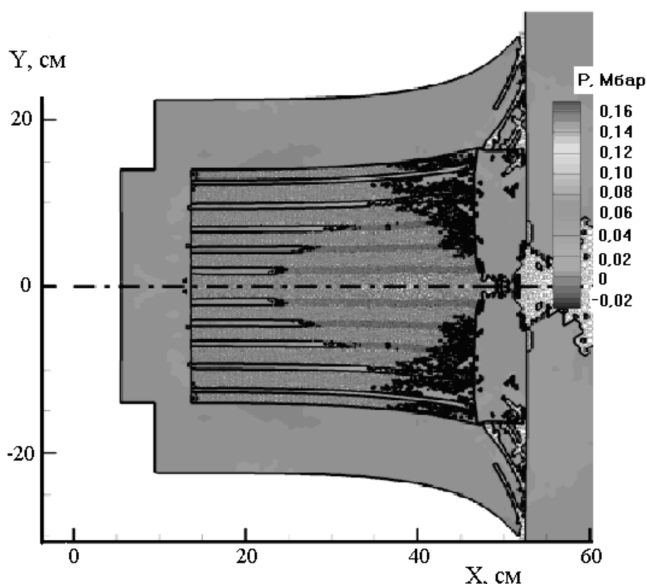


Рис. 5. Разрушение частично обгоревшего реактора КЯЭУ по расчету в 2D-постановке

В ИТПМ СО РАН в ходе совместных работ с ФГУП «Красная Звезда» решена задача построения уравнений состояния реакторных материалов в широком диапазоне давлений и температур (сотни тысяч атмосфер и тысячи градусов) при ограниченном наборе общедоступных констант (шесть констант при нормальных условиях), а именно:  $V_0$  — начальный удельный объем,  $\beta$  — коэффициент теплового расширения,  $K_t$  — изотермический модуль объемного сжатия,  $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении,  $G$  — модуль упругости,  $c_{v,e0}$  — электронная теплоемкость.

Уравнение состояния для твердого тела:

$$F(V, T) = E_x(V) + c_{v,l} T \ln\left(\frac{\Theta(V)}{T}\right) - \frac{c_{v,e0}}{2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3} T^2 \quad (4)$$

или

$$E = -T^2 \left( \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{F}{T} \right) \right)_V ;$$

$$E = E_x + c_{v,l} T + \frac{c_{v,e} T^2}{2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3} ; P = - \left( \frac{\partial F}{\partial V} \right)_T$$

$$P = - \left( \frac{dE_x}{dV} \right) + \frac{\gamma_l c_{v,l} T}{V} + \frac{c_{v,e} T^2}{3V} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3} ,$$

где  $V, V_0$  — удельный и начальный удельный объем;  $T$  — температура;  $c_v = c_{v,l} + c_{v,e}$  — теплоемкость при постоянном объеме: тепловая плюс электронная составляющая;  $\Theta(V)$  — температура Дебая;  $E_x$  — удельная внутренняя энергия на нулевой изотерме (холодная), которая вычисляется из обобщенной модели коэффициента Грюнайзена  $\gamma(V)$  [3];  $c_{v,l} T \ln(\Theta(V)/T)$  и  $c_{v,e} (V/V_0)^{2/3} T^2 / 2$  — тепловая и электронная составляющие внутренней энергии соответственно.

В настоящее время ведется работа по построению алгоритмов и компьютерных программ для исследований ударного воздействия в широком диапазоне скоростей — от сотен до десятков тысяч метров в секунду. Параллельно разрабатываются упрощенные инженерные методики анализа повреждения конструкции КЯЭУ и ее реактора.

### Выводы

Выполненные исследования и методические разработки по ударному воздействию на конструкцию КЯЭУ позволили оценить последствия аварийных ситуаций с установками 1-го поколения; в настоящее время задача состоит в создании 2D методик расчета последствий удара по КЯЭУ.

### Библиографический список

1. Nazarenko A.I., Grinberg E.I. et al. Spacecraft with a Nuclear Power System and Problem of Space Debris. Proc. Forth European Conference in Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, April 2005 (ESA SP-587), pp 557-562.
2. Высокоскоростное взаимодействие тел / В.М.Фомин, А.И.Гулидов, Г.А.Сапожников и др. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999.
3. Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Модельные уравнения термодинамических функций состояния веществ. 1.Твердое тело // Физическая мезомеханика. 2004. Т.7. С. 285-288.

ФГУП «Красная Звезда»

Статья поступила в редакцию 01.03.2009