

УДК 621.039.57

## **Анализ последствий аварий, приводящих к падению реактора космической ядерной энергоустановки на Землю**

**Федоров М.Ю.<sup>1\*</sup>, Краус Е.И.<sup>2\*\*</sup>, Шабалин И.И.<sup>2\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Компания «Красная Звезда», Электролитный проезд, 1А,  
Москва, 115230, Россия*

<sup>2</sup>*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

*\*e-mail: [re.entry@relcom.ru](mailto:re.entry@relcom.ru)*

*\*\*e-mail: [kraus@itam.nsc.ru](mailto:kraus@itam.nsc.ru)*

*\*\*\*e-mail: [shabalin@itam.nsc.ru](mailto:shabalin@itam.nsc.ru)*

### **Аннотация**

В статье рассматриваются последствия аварийных ситуаций с космическими аппаратами, снабженными реакторной ядерной энергетической установкой (ЯЭУ), в результате которых возможно падение на поверхность Земли ядерного реактора. Аварийные ситуации (АС) возникают из-за отказов ступеней ракеты носителя или несанкционированного, схода ЯЭУ с радиационно безопасной орбиты, например, из-за столкновения ЯЭУ с фрагментами космического мусора (КМ). В результате на поверхность Земли падает реактор ЯЭУ или его обгоревший фрагмент, имеющий в составе активную зону (АЗ).

С помощью численных экспериментов на 2D моделях получены данные о состоянии ядерного реактора после столкновения с тремя видами поверхности:

жесткая – гранит, менее жесткая – песчаник, вода, что позволяет сделать выводы по степени радиационной опасности разрушенного объекта, а затем предусмотреть меры по ликвидации последствий радиационной аварии.

Исследования последствий падения реактора включают следующие этапы:

- построение геометрической модели адекватной методике расчета;
- расчеты параметров ударно-волновых процессов с применением специально разработанных программных средств;
- анализ и интерпретация полученных результатов, с точки зрения радиационной опасности.

Анализ результатов расчетов показывает, что в случаях столкновения с поверхностью реализуются условия для подкритического состояния АЗ за счет отделения отражателя нейтронов и наличия в АЗ стержней безопасности.

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

### **Аварийные ситуации с ядерными источниками энергии**

Применение ядерных источников энергии (ЯИЭ), включая реакторные ядерные энергоустановки (ЯЭУ) в качестве бортовых источников электропитания космических аппаратов (КА) требует обеспечения ядерной и радиационной безопасности подобных систем. В том числе требуется оценивать состояние ядерного реактора и его радиоактивных материалов после аварий, связанных с ударным воздействием на конструкцию.

В настоящей работе рассматриваются два сценария аварийных ситуаций, связанных с падением ядерного реактора на поверхность Земли.

Первый сценарий, когда в результате столкновения КА с крупными фрагментами техногенной природы – космическим мусором (КМ) [1] может произойти торможение КА с ЯЭУ, спуск с орбиты и падение на поверхность Земли. При этом происходит разрушение остаточной, обгоревшей конструкции реактора, уже набравшего радиоактивность. Причем подобное событие может произойти как при функционировании ЯЭУ на высокой рабочей орбите, так и при сравнительно кратковременном нахождении КА с ЯЭУ на промежуточной орбите, где производится включение ядерного реактора, разогрев теплоносителя и выход на рабочий режим.

Результатом такого сценария становится радиоактивное заражение места падения. Это вызывает необходимость принятия мер по изъятию радиоактивных материалов реактора и дезактивации зараженного участка Земной поверхности.

Второй сценарий связан с авариями ракеты-носителя (РН) на этапе выведения КА с ЯЭУ. В этом случае происходит падение "холодного реактора" еще не наработавшего радиоактивность, и главным становится вопрос – может ли самопроизвольно возникнуть цепная ядерная реакция в активной зоне.

При реализации обоих сценариев аварийной ситуации скорость встречи с поверхностью может варьироваться от 100 до 400 м/с. Такой удар относится к низкоскоростному типу [2].

Степень разрушения конструкции реактора зависит от того, с какой поверхностью произойдет столкновение. При анализе последствий удара конструкции о поверхность достаточно рассматривать три типа поверхности: жесткая – гранит, менее жесткая – песчаник (плотный песок) и вода.

Работы по анализу ударного воздействия на конструкцию ЯЭУ имеют целью получение оценки возможных состояний реактора и ядерного топлива для последующего прогнозирования радиационного воздействия на окружающую среду и население.

В настоящей работе приведены результаты расчетов состояния реакторов ЯЭУ при ударе о поверхность (первые два сценария аварийных ситуаций), полученные в двумерном (2D) приближении.

Исследования ударного воздействия на конструкцию включают три основных этапа:

- первый этап – построение геометрической модели реактора адекватной методике расчета;
- второй этап – расчеты параметров ударно-волновых процессов с применением специально разработанных программных средства;
- третий этап – анализ и интерпретация результатов для последующего формирования исходных данных для нейтронно-физических расчетов.

### **Формирование геометрической модели реактора**

Для исследования процесса разрушения реактора при ударе рассматриваются несколько моделей, отражающих существенные геометрические свойства конструкции и состав материалов: цилиндрическая модель, представляющая собой поперечное сечение реактора, аксиальная модель и плоская модель.

Все три типа моделей пригодны для исследования как последствий низкоскоростного удара, реализующегося при падении частично обгоревшего реактора на поверхность Земли, так и для высокоскоростного удара (скорость до 16 км/с) на околоземной орбите. Высокоскоростной удар по ЯЭУ характерен тем, что приводит к образованию кратера, сквозному пробою, частичному или полному разрушению реактора с образованием в космическом пространстве многочисленных осколков и фрагментов конструкции, содержащих радиоактивность [3].

В 1987 году в составе КА “Космос 1818” и “Космос 1867” были проведены летно-конструкторские испытания ЯЭУ “Тополь”. В настоящее время эти два объекта продолжают находиться на радиационно безопасной орбите, но могут представлять опасность в случае наступления аварийного спуска с орбиты.

На рисунке 1 представлена цилиндрическая модель (модель №1) реактора термоэмиссионной ЯЭУ “Тополь” с 12 регулирующими цилиндрами в боковом отражателе нейтронов и концентрическими рядами электрогенерирующих каналов (ЭГК) в замедлителе из гидрида циркония. ЭГК представляют собой твэлы со встроенным термоэмиссионным преобразователем тепловой энергии ядерной реакции в энергию электрическую.

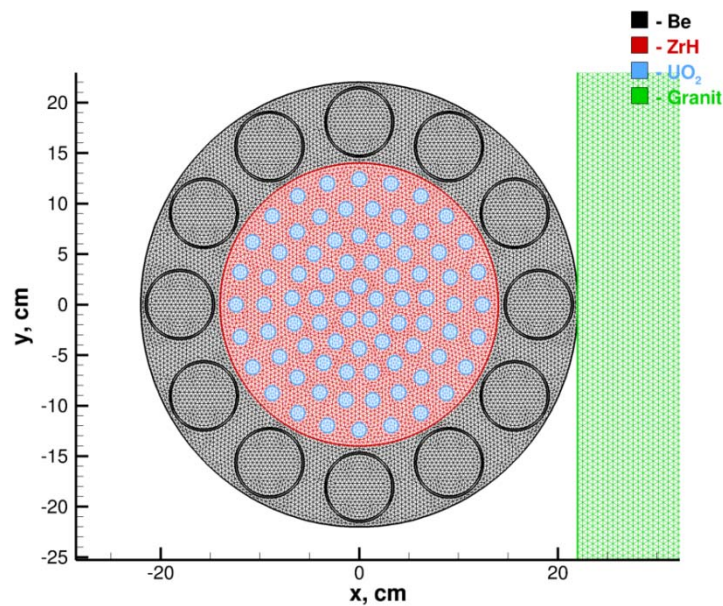


Рисунок 1 – Цилиндрическая модель реактора “Тополь” (модель №1)

Построение аксиальной 2D модели №2 осуществляется путем приведения каждого из concentрических рядов ЭГК к цилиндрическому слою при применении следующих геометрических соотношений

$$S = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) = n \frac{\pi D_{\text{ЭГК}}^2}{4}, \quad (1)$$

$$d_{\text{mid}} = \frac{1}{2}(d_2 + d_1),$$

откуда

$$d_1 = d_{\text{mid}} - \frac{n \cdot D_{\text{ЭГК}}^2}{4 \cdot d_{\text{mid}}}, \quad d_2 = d_{\text{mid}} + \frac{n \cdot D_{\text{ЭГК}}^2}{4 \cdot d_{\text{mid}}}; \quad (2)$$

где  $S$  – площадь цилиндрического слоя равная площади твэлов в каждом ряду, мм<sup>2</sup>;  $d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметр каждого цилиндрического слоя, мм;  $d_{\text{mid}}$  – срединный диаметр цилиндрического слоя, равный диаметру ряда размещения ЭГК (твэлов), мм;  $n$  – количество ЭГК в ряду,  $D_{\text{ЭГК}}$  – диаметр ЭГК.

Полученные формулы подразумевают сохранение объемных соотношений между материалами в модели. Показанные на рисунках 1 и 2 модели характеризуют состояние реактора после спуска с орбиты, аэродинамического нагрева и частичного разрушения конструкции в плотных слоях атмосферы. Падающий объект представляет собой активную зону, заключенную в оболочку из бокового отражателя нейтронов с органами регулирования, закрытую с двух сторон дисками торцевого отражателя.

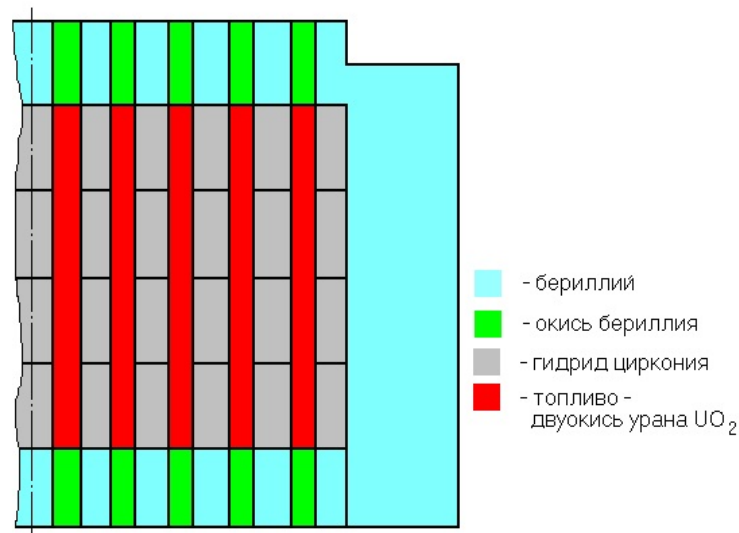


Рисунок 2 – Аксиальная модель реактора “Тополь” (модель №2)

Аналогичная цилиндрическая модель построена для конструкции реактора, система безопасности которого включает сброс блоков бокового отражателя нейтронов в случае наступления аварийной ситуации. Тогда с достаточной степенью уверенности можно предполагать, что в результате спуска в атмосфере, реактор будет представлять собой АЗ в составе оплавленных по боковой цилиндрической

поверхности дисков замедлителя из гидрида циркония. Диски "нанизаны" на каналы теплоносителя, в которых расположены ЭГК, содержащих ядерное топливо – двуокись урана.

Поперечное сечение такой модели показано на рисунке 3. Модель №3 представляет собой многосвязную область, образованную гидридом циркония и многочисленными включениями топлива.

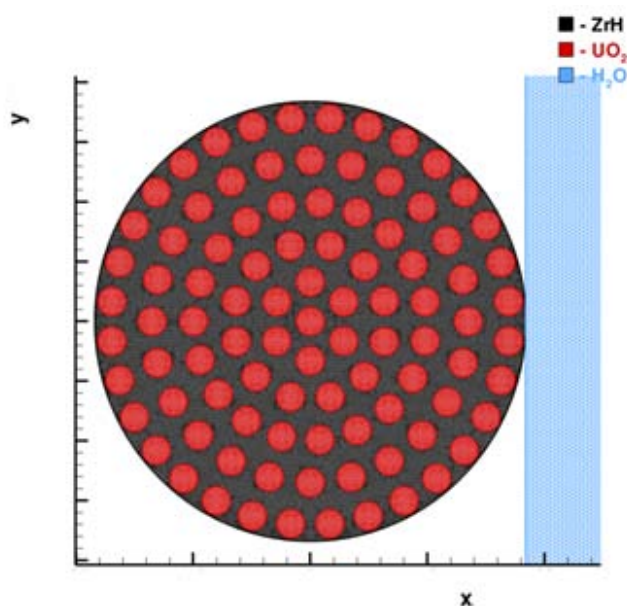


Рисунок 3 – Модель реактора без бокового отражателя (модель №3)

При разработке геометрических моделей приходится исключать из рассмотрения тонкостенные элементы, например, оболочки ЭГК. В противном случае, даже умеренная детализация модели влечет за собой существенное увеличение времени счета, поскольку величина шага интегрирования по времени в нестационарной задаче определяется элементом наименьшего линейного размера.



## Результаты расчета последствий низкоскоростного удара

На рисунке 4 приведены фазы взаимодействия модели №1 реактора “Тополь” с “блоком” из песчаника со скоростью 400 м/с. Рассматривается контакт “боком”.

Разрушения поверхности песчаника начинается на волновой стадии сжатия, причем на периферии области контакта там, где существенны сдвиговые деформации. Это формирует своеобразный “клин”, направленный к центру модели (вторая фаза – 100 мкс).

“Клин” тормозит область у контакта, что вызывает сдвиговые деформации в боковом бериллиевом отражателе с цилиндрами, заставляя модель обтекать своеобразное препятствие. Затем, к моменту времени порядка 150 мкс формируется зона сквозного повреждения бокового отражателя. Одновременно происходит деформирование всей массы дисков замедлителя, причем в центральной части действуют растягивающие напряжения, возникающие в зоне встречи двух волн разгрузки, что приводит к растрескиванию гидрида циркония.

Процесс торможения модели приводит к образованию зоны сплошного разрушения песчаника, уплотнению его фрагментов и образованию однородной “подушки”, контактирующей с разрушающейся моделью. На момент 450 мкс наблюдается растрескивание гидридного замедлителя и образование фрагментов отражателя. Массивные ЭГК раздавливают хрупкий гидрид циркония.

На момент времени 850 мкс, как видно из рисунка 4 регулирующие цилиндры, не подверженные прямому контакту, отделяются целиком.

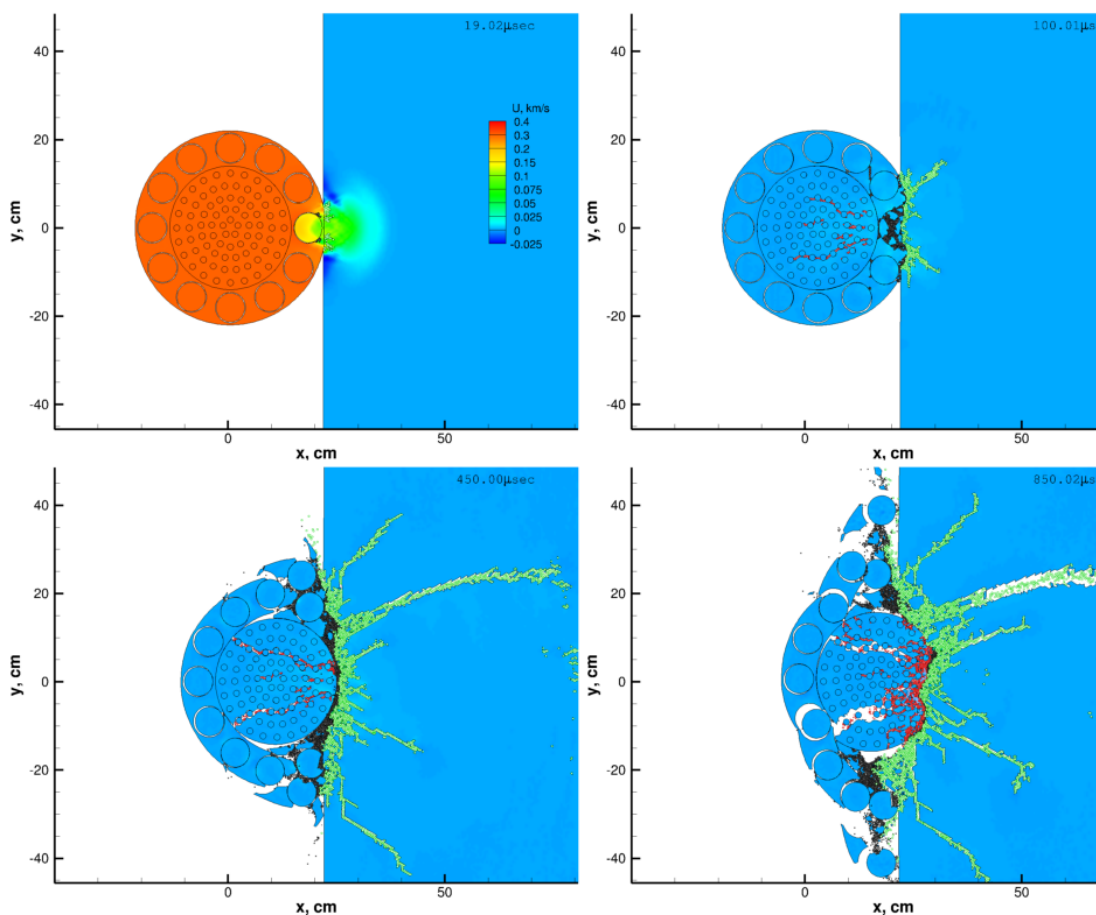


Рисунок 4 – Процесс столкновения модели №1 с песчаником.

На рисунке 5 показан результат расчета столкновения той же модели №1 с поверхностью воды (скорость 400 м/с). В расчете использована грубая модель “разрушающейся” воды, то есть считается, что большие деформации частиц воды приводят к нарушению её сплошности, что позволяет в алгоритме устранить логические связи соседних узлов конечно-разностной сетки.

В начальный момент соприкосновения модели с водой от поверхности контакта отходят волны сжатия, а со свободных поверхностей – волны разгрузки и формируется зона сложного напряженного состояния (рисунок 5).

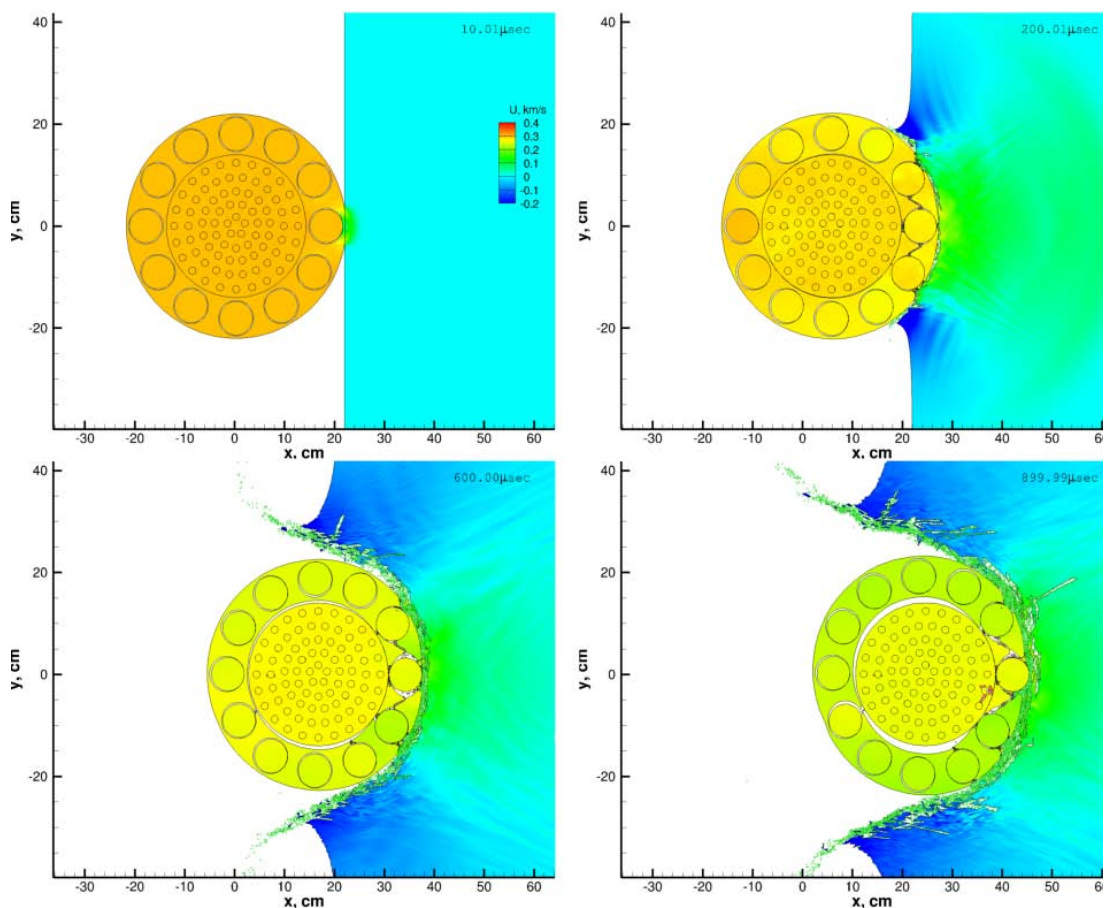


Рисунок 5 – Процесс столкновения реактора с поверхностью воды

Проникание модели вызывает движение воды и формирование водяного кратера. Поскольку акустическая жесткость воды существенно ниже чем акустическая жесткость бериллиевого отражателя, то внутри реактора волны сжатия быстро снимаются волнами разгрузки, за счет этого в модели не возникает больших напряжений и деформаций и не происходит интенсивного разрушения материалов. Частичному разрушению подвергается лишь боковой бериллиевый отражатель, ослабленный отверстиями под регулирующие цилиндры.

В процессе проникания в воду модель постепенно тормозится.

Аналогичные расчеты выполнены для модели реактора №3, приведенной на рисунке 3.

Рассмотрим взаимодействие модели №3 с гранитной плитой. Скорость взаимодействия 400 м/с.

От поверхности контакта реактора и гранитного основания распространяются волны сжатия – рисунок 6. Поскольку к области взаимодействия гранита и модели примыкают свободные границы, то с этих границ формируются волны разгрузки, при этом сдвиговые деформации превышают предельные и гранит разрушается с образованием характерных косых макротрещин. Центральная часть модели начинает останавливаться, тогда, как периферийные области еще движутся свободно.

Из-за наличия разницы осевых скоростей по сечению модели в массе гидрида возникают сдвиговые деформации, и по достижении предельных величин деформаций образуются трещины. Трещины распространяются между ЭГК, снимая напряжения.

В центральной области взаимодействия идет уплотнение фрагментов разрушенного гранита и начинает формироваться радиальное течение, ведущее к образованию кратера в гранитном основании (рисунок 6а). Поскольку скорость удара не велика, то процесс взаимодействия протекает в квазидинамическом режиме (рисунок 6б). Сдвиговые трещины в модели прорастают по мере накопления деформаций. В лидирующей части идет процесс расплющивания и разрушения ЭГК.

Трещины в гидриде циркония достигают свободной поверхности модели, разделяя реактор на крупные фрагменты содержащие целые ЭГК (рисунок 6в).

К моменту времени  $t = 700$  мкс (рисунок 6г) оставшаяся часть модели теряет примерно половину своей скорости, в плите сформировался кратер, а ЭГК в лидирующей части реактора разрушены. Вынос разрушенного гранита из кратера становится заметным. В граните растут трещины вдоль свободной поверхности.

На рисунке 7 приведены фазы бокового удара модели реактора №3 о поверхность воды со скоростью 400 м/с. Процесс в целом аналогичен процессу удара о воду модели №1 но с тем отличием, что в данной модели отсутствует прочный корпус из бериллия поэтому разрушение оплавленных, гидридных дисков происходит в тонком слое контакта. При проникании модели в воду больших деформаций не наблюдается, следовательно, нет и заметных разрушений.

Модель, так же, как и в ранее рассмотренном случае "медленно" погружается в воду, скорость падает и к моменту времени  $t = 500$  мкс объект теряет примерно 50 м/с.

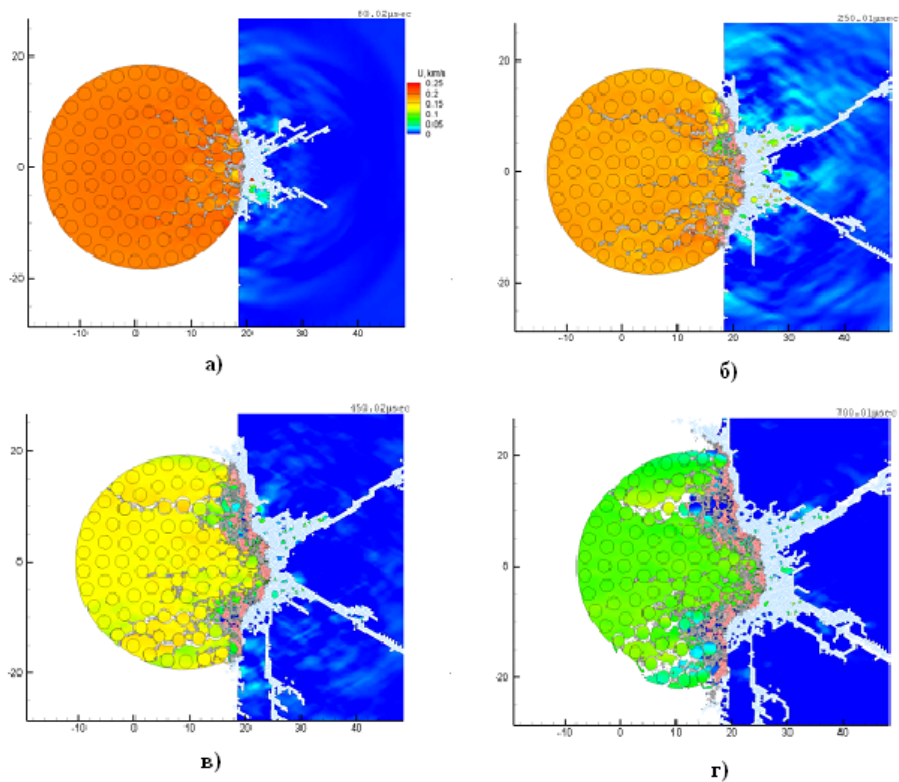


Рисунок 6 – Фазы взаимодействия модели №3 с гранитом

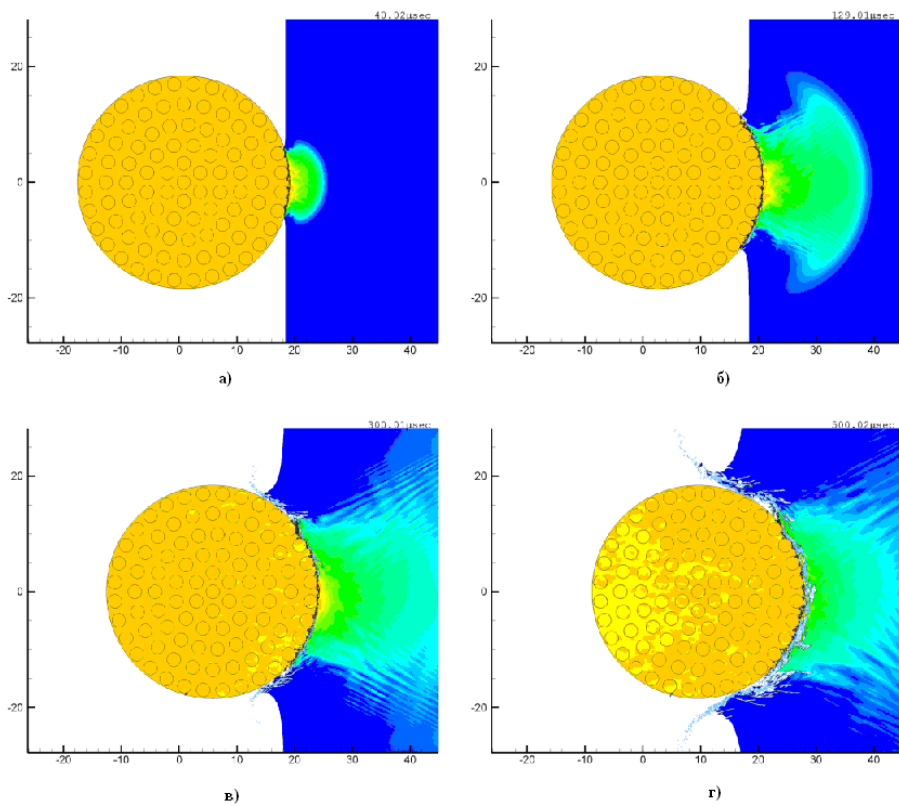


Рисунок 7 – Фазы взаимодействия модели с поверхностью воды

В заключение отметим, что процесс соударения модели №3 с поверхностью песчаника в целом повторяет закономерности взаимодействия с гранитным основанием.

Для более полного представления последствий удара реактора о поверхность в случае аварий (досрочный спуск и авария РН), в дополнение к цилиндрической модели реактора, построена его плоская модель (рисунок 8). Модель №4 построена в виде набора слоев, сечение которых совпадает с продольным сечением конструкции реактора. Такая модель, в отличие от двух первых, представляет собой некую абстракцию, однако повторяет распределение плотностей материалов АЗ по продольному сечению.

Перейдем к рассмотрению поведения плоской модели при низкоскоростном ударе о поверхность.

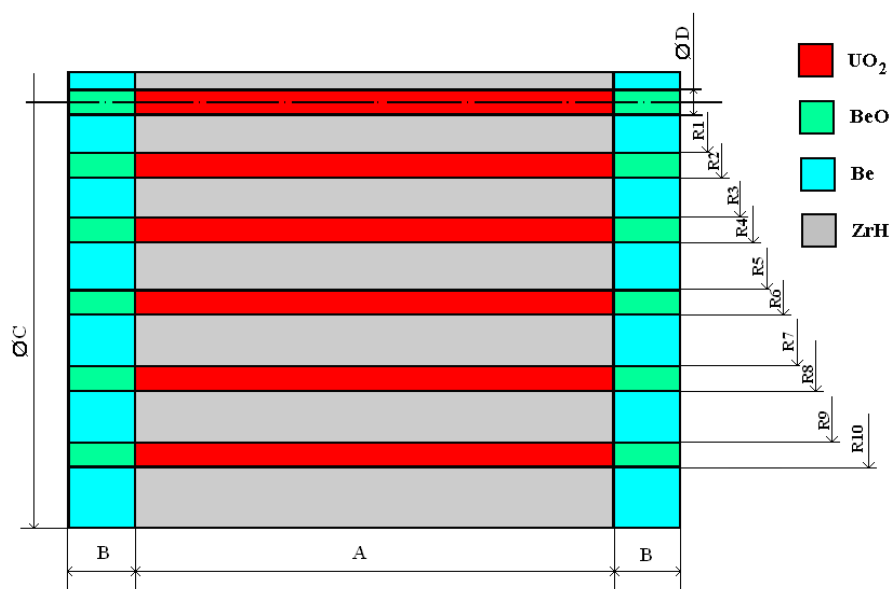


Рисунок 8 – Плоская модель (показана 1/2 часть)

Модель позволяет посмотреть на процесс ударного взаимодействия с преградой в другом ракурсе и получить информацию о поведении реакторных материалов, которую нельзя получить из расчетов на модели №3.

Для плоской модели реактора рассмотрены те же самые преграды, что и в предыдущих случаях.

На рисунке 9 показаны основные стадии разрушения активной зоны при столкновении с гранитной преградой, на рисунке 10 – с песчаником, а на рисунке 11 показаны фазы проникновения модели в воду. Наиболее важным обстоятельством при рассмотрении процессов, показанных на всех трех рисунках, является то, что происходит отделение торцевых отражателей ЭГК из легкой окиси бериллия, что способствует более глубокому подкритическому состоянию АЗ.

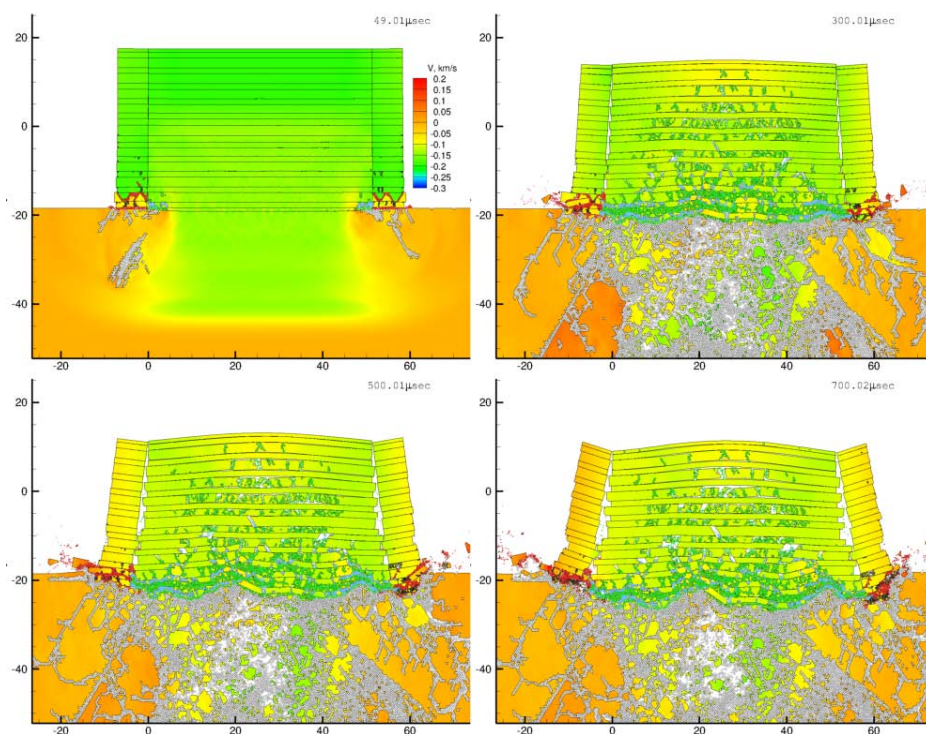


Рисунок 9 – Фазы взаимодействия плоской модели реактора с гранитом



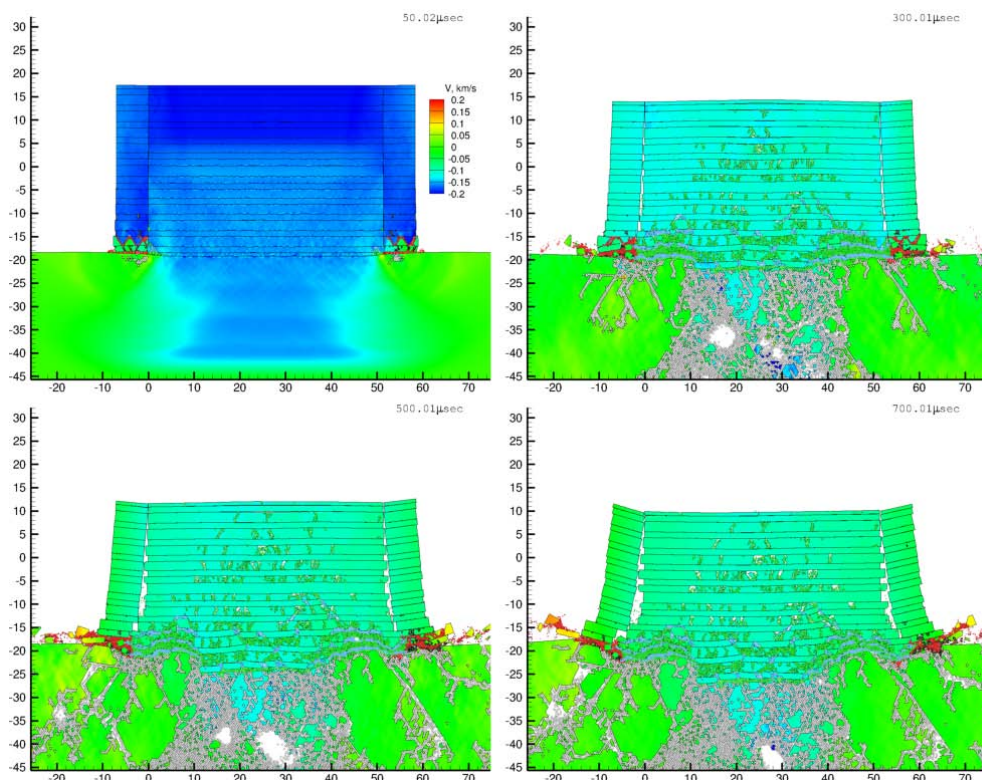


Рисунок 10 – Фазы взаимодействия плоской модели с песчаником

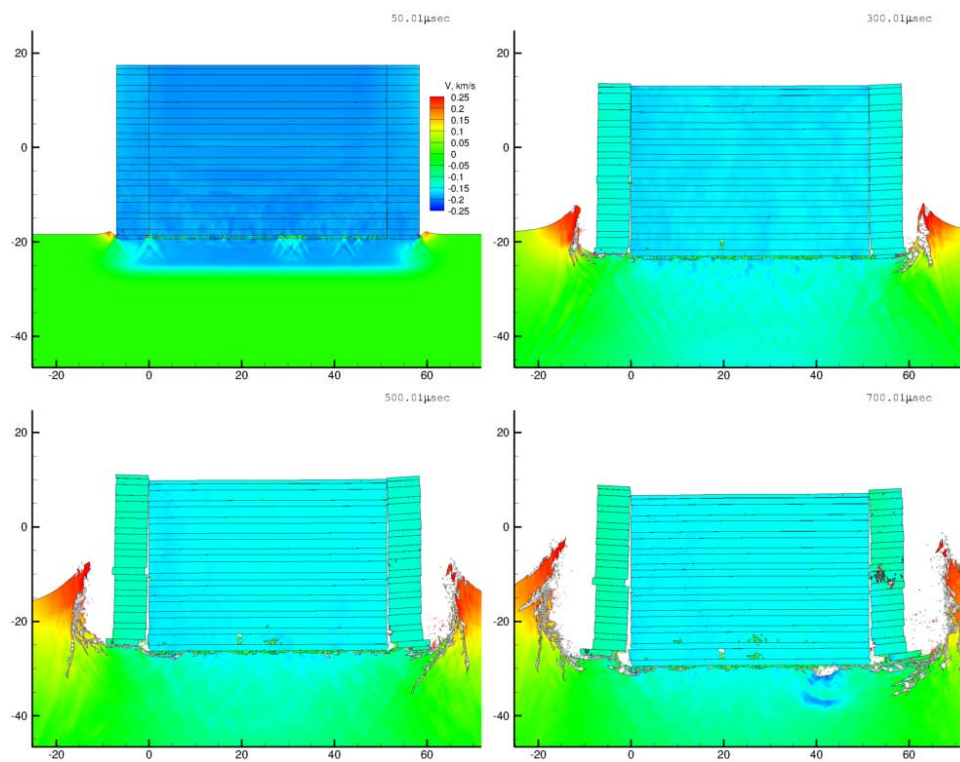


Рисунок 11 – Взаимодействие плоской модели реактора с водой

Сравнение рисунков 9 и 10 демонстрирует очевидный факт, что при столкновении с гранитом имеют место более значительные разрушения ЭГК, чем при взаимодействии с менее прочным песчаником. Тем не менее, и в случае песчаника фрагментация ядерного топлива достигает самых верхних слоев модели.

Столкновение плоской модели с поверхностью воды (рисунок 11) в целом повторяет аналогичный процесс, характерный для цилиндрической модели. Разрушение касается только тонкого лидирующего слоя, но с одновременным сдвигом торцевых отражателей ЭГК.

## **Выводы**

Выполнено численное моделирование удара о поверхность гранита, песчаника и воды обгоревшего и частично разрушенного при спуске в атмосфере реактора ЯЭУ “Тополь” в форме цилиндрической модели, а для объекта без бокового отражателя расчетные исследования проведены для цилиндрической и плоской модели.

Результаты моделирования удара реактора о поверхность формируют исходную информацию для выполнения нейтронно-физических расчетов в обоснование безопасности космических ЯЭУ.

В конечном состоянии разрушенный реактор представляет собой достаточно компактный объект, локализация и изъятие которого возможно при применении существующих в ядерной сфере технологий.

## **Библиографический список**

1. Адушкин В.В., Козлов С.И., Петров А.В. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду. –М.: Изд-во Анкил, 2000. 640 с.
2. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 600 с.
3. Федоров М.Ю., Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Моделирование ударных воздействий на конструкцию в проблеме обеспечения безопасности космических ЯЭУ // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 3. С.49-53.