

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОУДАРЕНИЯ СЛОЖНЫХ ДВУМЕРНЫХ ТЕЛ О ДЕФОРМИРОВАННУЮ ПРЕГРАДУ

Е. И. КРАУС, В. М. ФОМИН, И. И. ШАБАЛИН

Институт теоретической и прикладной механики

им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: kraus@itam.nsc.ru, fomin@itam.nsc.ru, shabalin@sbras.nsc.ru

On the basis of additive approximation the simplified models of a complex technical object — the reactor block of the nuclear power installation of a space vehicle — are constructed. Calculations of the impact of a simplified model of the reactor block on the surface of granite and sandstone plates have been made.

В аварийных ситуациях космические аппараты “отстреливают” ЯЭУ (ядерные энергетические установки). Существует вероятность того, что часть реактора, несмотря на значительные тепловые и механические нагрузки при прохождении плотных слоев атмосферы, может достичь поверхности земли. Скорость соударения оставшейся части реакторного блока может достигать 400 м/с. Причем ввиду разнообразия земной поверхности блок может встретить на своем пути водную поверхность, горные породы или мягкие грунты.

Несмотря на современный уровень развития вычислительной техники и наличие достаточно реалистических математических моделей поведения материалов, решение задач удара реальных технических объектов получить практически невозможно. Это обусловлено сложностью пространственного расположения деталей и наличием многих масштабов. В таких случаях используются упрощения объекта, которые позволяют построить ряд моделей для исследования влияния ударных параметров на основные детали объекта.

Рассмотрим задачу удара реактора космической ЯЭУ с поверхностью земли в двумерной постановке. Особенность такой постановки — наличие многосвязной расчетной области с большим количеством контактных поверхностей.

Цель работы — исследование процессов деформирования и разрушения сложного объекта. Будем исходить из лагранжева способа описания среды как наиболее подходящего для описания взаимодействия твердых деформируемых тел. Модель состоит из уравнений баланса массы, импульса и энергии, а также уравнений состояния и упругопластического течения Прандтля — Рейса [1]. Для учета процессов разрушения система дополняется соотношениями, связывающими параметры напряженно-деформированного состояния с предельными величинами материалов.

Уравнения траектории материальных частиц

$$\dot{x}_i = u_i. \quad (1)$$

Уравнение неразрывности среды

$$V_0 \rho_0 = V \rho. \quad (2)$$

Закон изменения импульса материальной частицы

$$\rho \dot{u}_i = \sigma_{ij,j}. \quad (3)$$

Изменение внутренней энергии частицы

$$\rho \dot{e} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}. \quad (4)$$

Тензор скоростей деформаций имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (5)$$

Тензор напряжений представим в общепринятой форме

$$\sigma_{ij} = -\delta_{ij} P + s_{ij}, \quad (6)$$

где s_{ij} — девиатор тензора напряжений, отвечающий за реакцию на сдвиговое формоизменение материальной частицы; δ_{ij} — символ Кронекера; $P(\rho, T)$ — давление как функция текущей плотности и температуры [2,3].

Уравнения процесса принимаем в форме Прандтля — Рейсса

$$\overset{\nabla}{s}_{ij} + d\lambda' s_{ij} = 2G \dot{\varepsilon}'_{ij}, \quad \dot{\varepsilon}'_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij} \frac{\delta_{ij}}{3} \quad (7)$$

при условии пластичности Губера — Мизеса

$$s_{ij} s_{ij} \leq \frac{2}{3} Y_0^2, \quad (8)$$

где Y_0 — динамический предел текучести, а для определения скалярного множителя $d\lambda'$ используется известная процедура приведения к кругу текучести. Материальная частица, двигаясь вдоль своей траектории, может вращаться как жесткое целое, что учитывается производной Яумана

$$\overset{\nabla}{s}_{ij} = \dot{s}_{ij} - \omega_{ik} s_{kj} - \omega_{jk} s_{ki}, \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}). \quad (9)$$

В приведенных выше уравнениях (1)–(9) использованы общепринятые обозначения: каждый из индексов i, j, k пробегает значения (1, 2, 3); 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; ρ — текущая плотность, G — модуль сдвига.

Алгоритм реализации условий пластического течения впервые предложил М.Л. Уилкинс в работе [1]. Приведение напряжений на круг текучести эквивалентно решению полных соотношений теории пластического течения (см. примечание С.С. Григоряна к работе [1]).

Известно, что все материалы обладают конечной прочностью, но имеют различные механизмы разрушения, которые реализуются в разных условиях нагружения. Обычно

справочники по механическим свойствам материалов приводят кинематические и силовые характеристики.

Одним из простых критериев разрушения металлов на волновой стадии является критерий Тулера — Бучера [4]

$$\sigma_t = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} (\sigma_1 - \sigma_1^*)_i \Delta t_i}{\sum_{i=n_1}^{n_2} \Delta t_i} > \sigma_t^*,$$

где i — номер временного шага; σ_1 — главное растягивающее напряжение, причем суммирование выполняется только при условии $\sigma_1 - \sigma_1^* > 0$.

Если деформации на растяжение ε_1 или сдвиг ε_τ в процессе деформирования превысили предельные значения удлинения ε_1^* (т. е. $\varepsilon_1 > \varepsilon_1^*$), или сдвига ε_τ^* ($\varepsilon_\tau > \varepsilon_\tau^*$), то материал элемента считается разрушенным, т. е. он перестает сопротивляться растяжению и сдвигу, но оказывает сопротивление сжатию.

Металлы подвержены разрушению сдвигом, поэтому в качестве критерия разрушения на квазистатической стадии процесса деформирования выбрана работа напряжений на пластических деформациях. Если работа напряжений на пластических деформациях в какой-то момент времени станет больше критической $W_p = \sum \sigma_{ij} \Delta e_{ij}^p \geq W_p^*$, то произойдет разрушение материала и он потеряет способность сопротивляться сдвигу.

При численном моделировании процессов удара расчет контактного взаимодействия очень важен, поскольку точность расчета контактных границ в значительной мере определяет точность решения всей задачи в целом. Сложность реализации граничных условий на контактной поверхности заключается в том, что необходимо удовлетворить как кинематические, так и динамические условия на поверхности, положение которой также подлежит определению [5].

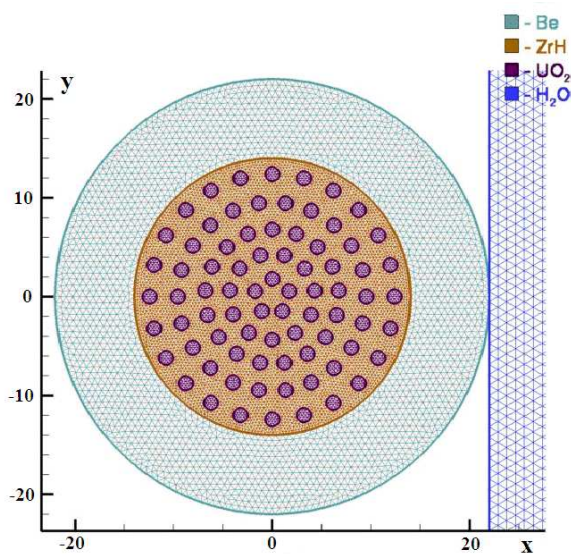


Рис. 1. Плоская геометрическая модель реактора (поперечное сечение).

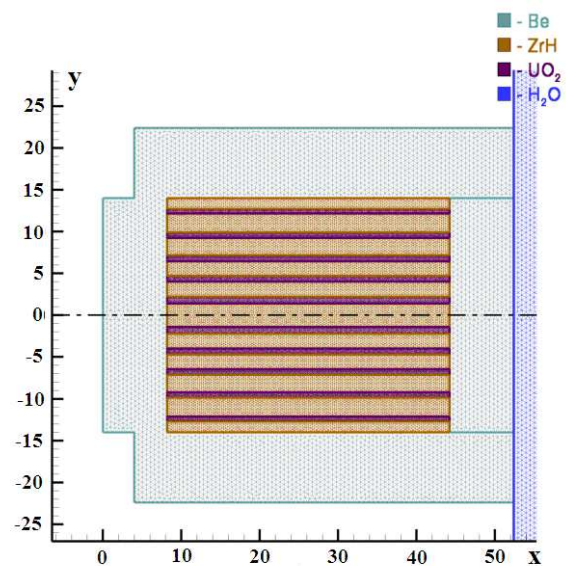


Рис. 2. Расчетная аксиальная геометрическая модель реактора.

Поскольку сечение реакторного блока представляет собой многосвязную область, возникает необходимость построения в ней треугольной сетки. Был использован следующий подход. Многосвязная счетная область погружалась в область, содержащую правильную треугольную сетку, затем все узлы, выходящие за пределы счетной области, отбрасывались. Таким образом получено распределение узлов на границах и внутри многосвязной счетной области без ее декомпозиции. Применение динамического метода движения узлов позволяет получить треугольную сетку с достаточно хорошими параметрами [6]. Пример сеток показан на рис. 1 и 2.

Задача решалась в упрощенной постановке. Упрощение заключается в том, что внутри реакторной зоны проведено осреднение материалов мелкомасштабных деталей в аддитивном приближении [3] (бериллий, двуокись урана и гидрид циркония составляют 95–97% по весу). Далее, считается, что при входе в плотные слои атмосферы внешние элементы конструкции сгорают и от реактора остается объект со сложным внутренним строением, показанным на рис. 1. и 2.

Рассмотрен удар реактора о гранит с начальной скоростью 400 м/с в аксиальной постановке. На рис. 3 показана кинограмма этого процесса соударения и разрушения. В на-

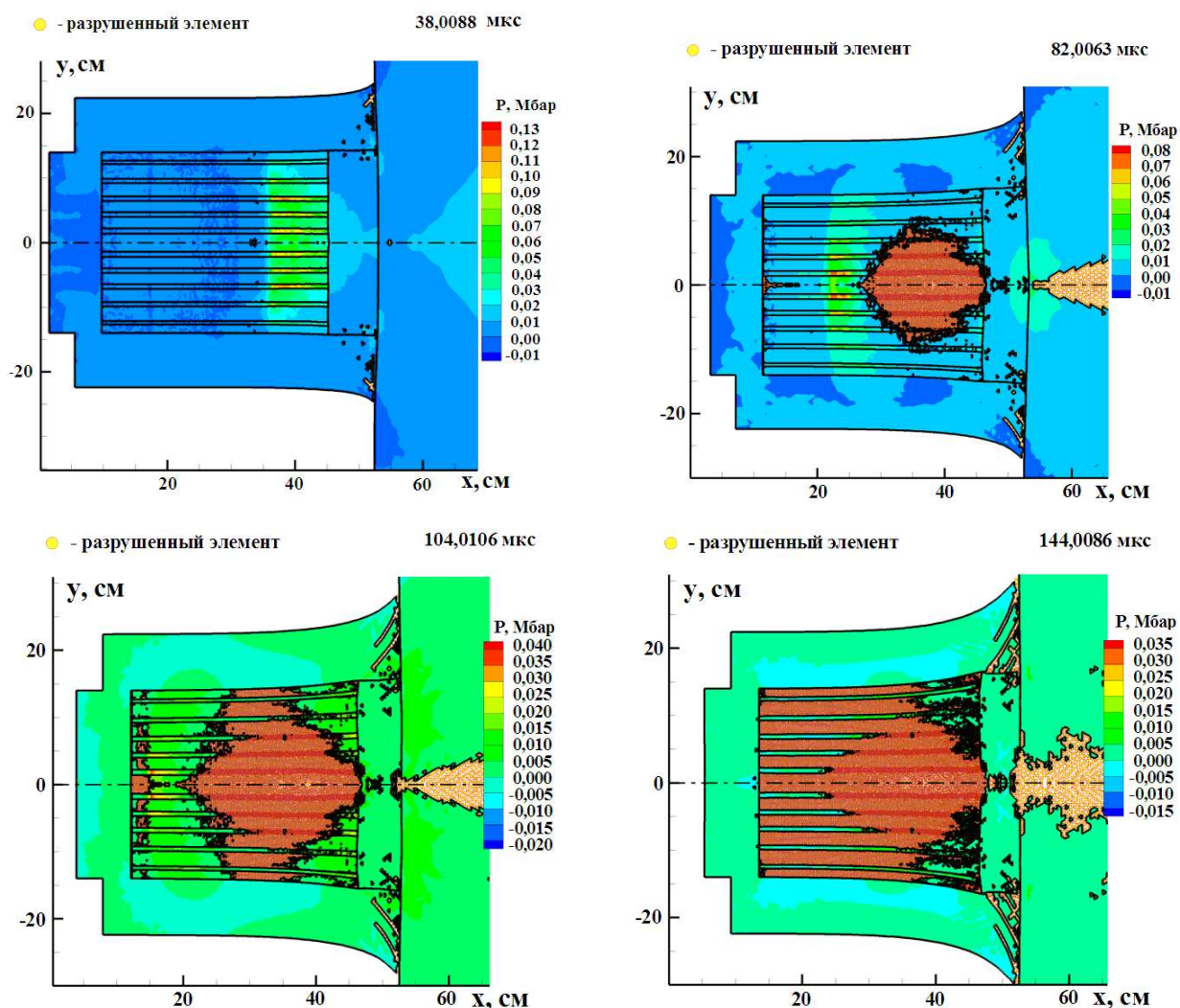


Рис. 3. Процесс соударения модели реактора с поверхностью гранитной плиты.

чальный момент времени от поверхности контакта реактора с гранитом в обе стороны начинают распространяться волны сжатия. Наличие боковых свободных поверхностей у реактора приводит к формированию волн разгрузки, уходящих внутрь, которые достигают оси реактора к моменту времени ~ 45 мкс. В результате на оси начинает формироваться область растягивающих напряжений. При достижении напряжениями предельных величин начинается процесс разрушения заливки из гидрида циркония и частично материала твэлов.

Разрушение бериллиевой оболочки происходит в квазистатическом режиме в основном по сдвиговому механизму. К моменту полной остановки реактора практически полностью разрушается внутреннее наполнение реактора и нарушается герметичность бериллиевой оболочки.

Таким образом, торцевой удар реакторного блока о гранитную плиту при скоростях 400 м/с приводит к полному разрушению внутренней структуры реактора, нарушению герметичности оболочки реакторного блока и как следствие возможному радиоактивному заражению места падения.

В случае удара реактора по песчанику со скоростью 400 м/с волновая картина осложняется тем, что песчаник обладает способностью разрушаться под действием сжимающих

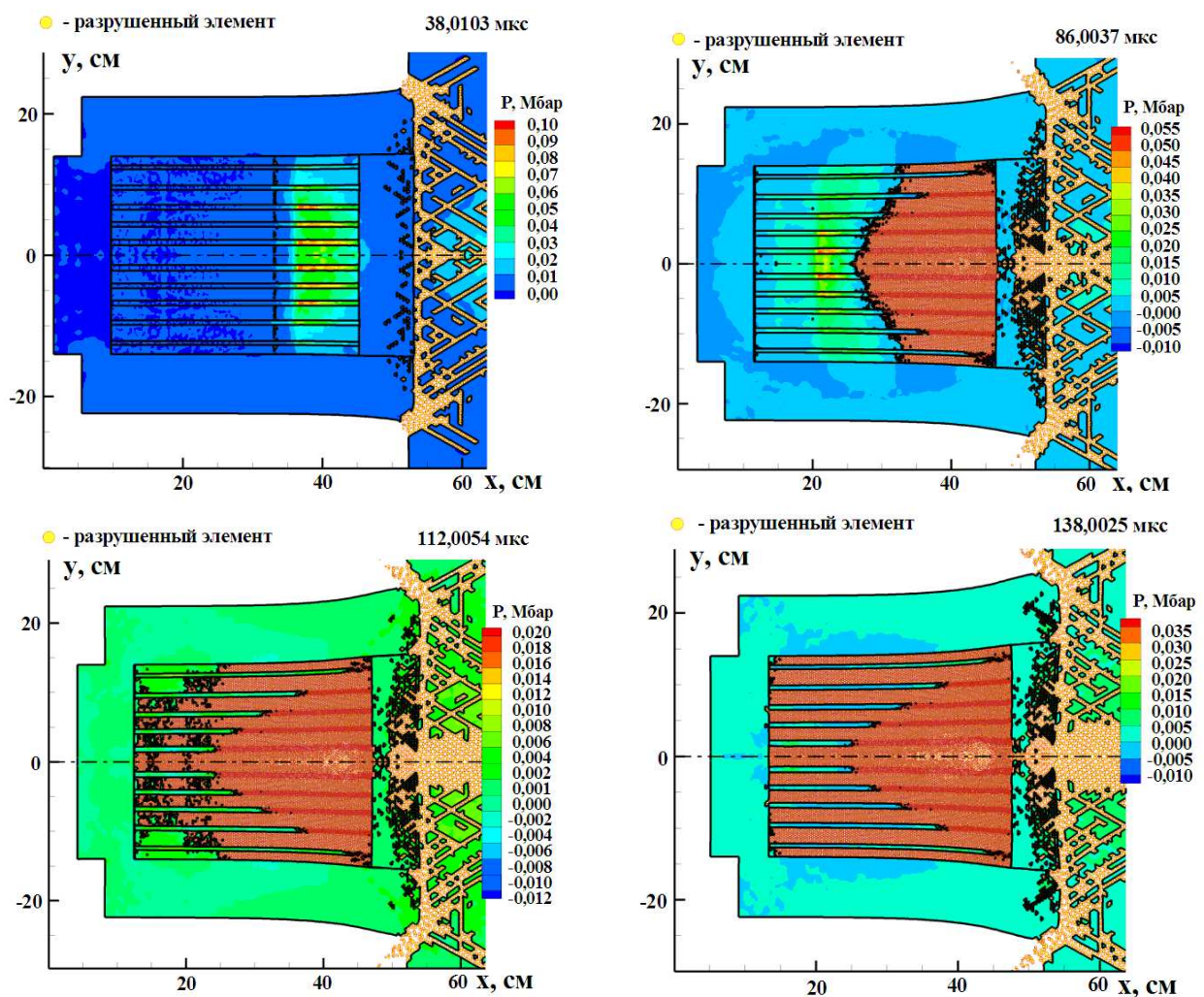


Рис. 4. Процесс соударения модели реактора с поверхностью плиты из песчаника.

напряжений. Эта особенность связана с внутренним строением песчаника, в котором прочные кристаллы песка связаны хрупкой цементной массой. Поскольку песок и цементная масса обладают различными коэффициентами сжимаемости, в волне сжатия на границах раздела сред формируются сдвиговые напряжения, которые разрушают их связь на границе, т. е. формируется песок с мелкой фракцией цементной массы. А свободный песок практически не сопротивляется сдвиговым деформациям.

Таким образом, в результате ударного сжатия в области у контактной поверхности реактора и песчаника формируется зона разрушенного материала и как следствие волна разгрузки. Взаимодействие боковых волн разгрузки и волны разгрузки из зоны разрушения приводит к формированию области растягивающих напряжений с более высокой амплитудой, что вызывает разрушение материалов реактора (заливки из гидрида циркония и твэлов). Механизм разрушения бериллиевой оболочки, как и в случае с гранитом, остается квазистатическим разрушением на сдвиг. Кинограмма всего процесса соударения модели реактора с песчаником представлена на рис. 4. Торцевая часть реактора разрушается, и возможен контакт материала раздробленных твэлов с песчаником, что может вызвать экологическое загрязнение среды.

Список литературы

- [1] Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
- [2] Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А., и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
- [3] Бузник В.М., Фомин В.М., Алхимов А.П. и др. Металлополимерные нанокompозиты. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 260 с.
- [4] TULER F.R., BUTCHER V.M. A criterion for the time dependence of dynamic fracture // Intern. J. Fract. Mech. 1968. Vol.4. P. 431–437.
- [5] Гулидов А.И., ШАБАЛИН И.И. Численная реализация граничных условий в динамически контактных задачах. Новосибирск, 1987. (Препринт АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТПМ. № 12).
- [6] SHIMADA K., GOSSARD D. Bubble Mesh: automated triangular meshing of non-manifold geometry by sphere packing // ACM Third Symp. on Solid Modeling and Appl. 1995. P. 409–419.

Поступила в редакцию 17 апреля 2006 г.