

Алгоритм адаптации конечно-элементной сетки в задачах разрушения твердых тел при динамических нагрузках

П. А. РАДЧЕНКО, С. П. БАТУЕВ, А. В. РАДЧЕНКО, К. В. ВИК
Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия
Контактный автор: Батуев Станислав П., e-mail: spbatuev@gmail.com

Поступила 25 декабря 2018 г., доработана 15 октября 2019 г., принята в печать 23 декабря 2019 г.

Представлен алгоритм эрозионного разрушения, позволяющий адекватно описывать разрушение материалов в области контактного взаимодействия. В результате работы данного алгоритма в области контактного взаимодействия происходит перестроение конечно-элементной сетки и пересчет сосредоточенных масс в узлах расчетной сетки в соответствии с законом сохранения массы. Представлена методика ускорения данного алгоритма путем использования параллельных вычислений. Результаты численного моделирования качественно и количественно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: высокоскоростное взаимодействие, деформация, разрушение, модель поведения материалов, численное моделирование, метод конечных элементов, параллельные вычисления.

Цитирование: Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В., Вик К.В. Алгоритм адаптации конечно-элементной сетки в задачах разрушения твердых тел при динамических нагрузках. Вычислительные технологии. 2020; 25(1):82–90.

Введение

Актуальной проблемой при численном моделировании высокоскоростного взаимодействия твердых тел является описание разрушения материала в области контактного взаимодействия. При высокоскоростном нагружении возникают области интенсивного разрушения взаимодействующих тел. Локальное искажение расчетной сетки может приводить как к падению величины шага по времени, так и к нарушению структуры расчетной сетки. Как правило, из численного расчета принято удалять разрушенные конечные элементы.

Исследования в данной области предлагают различные алгоритмы адаптации расчетной сетки [1–3]. Многие алгоритмы модифицируют сетку лишь в двумерном случае [4]. При создании и модификации конечно-элементных сеток в последнее время важную роль играют параллельные вычисления [5].

При решении задач пробития твердых тел в кратере преграды формируется обширная область разрушенного материала, которая существенно влияет на величину шага по времени для явных расчетных схем. В данном случае удаление элементов и узлов с массами отрицательно сказывается на адекватности решения, и ранее авторами был предложен алгоритм пересчета сосредоточенных масс в узлах расчетной сетки, позволяющий качественно описывать задачи динамического нагружения твердых тел [6].

1. Описание алгоритма

Реализация алгоритма эрозии [7] начинается при выполнении критерия разрушения в конечном элементе, находящемся на контактной поверхности. Рассмотрим тетраэдральный элемент E_1 , образованный узлами N_1, N_2, N_3, N_4 (рис. 1). При выполнении критерия разрушения в конечном элементе, находящемся на поверхности тела, происходит удаление данного элемента из расчетной сетки (рис. 1). К примеру, элемент E_1 имел общие грани с элементами E_5, E_9, E_{13} , после удаления из счета элемента E_1 образуются новые поверхностные треугольники: $N_1N_2N_4, N_1N_4N_3, N_2N_3N_4$ (рис. 2).

Одним из важных вопросов, возникающих при численной реализации алгоритма эрозионного разрушения, является выполнение закона сохранения массы. Существуют различные подходы к реализации поверхностной эрозии взаимодействующих тел при высокоскоростном нагружении. Авторами использован следующий подход: в случае, если один или несколько узлов разрушенного элемента больше не принадлежат другим элементам, то их масса равномерно распределяется между оставшимися узлами этого элемента.

Несмотря на все достоинства алгоритма эрозионного разрушения, подготовка данных для его реализации может занимать столько же времени, как и сам расчет. Данные, необходимые для его реализации:

- четыре массива данных, которые показывают, какой именно поверхности принадлежит каждая из четырех граней конечного элемента;
- массив, в котором хранится информация о всех смежных гранях, а именно номер элемента, номер его грани и номер смежного элемента и его грани.

С целью ускорения подготовки данных для алгоритма эрозионного разрушения был оптимизирован алгоритм поиска смежных граней элементов. До оптимизации использовался вариант перебора всех граней всех элементов и выполнялось сопоставление их друг с другом. Оптимизация алгоритма заключается в следующем. Вся конечно-

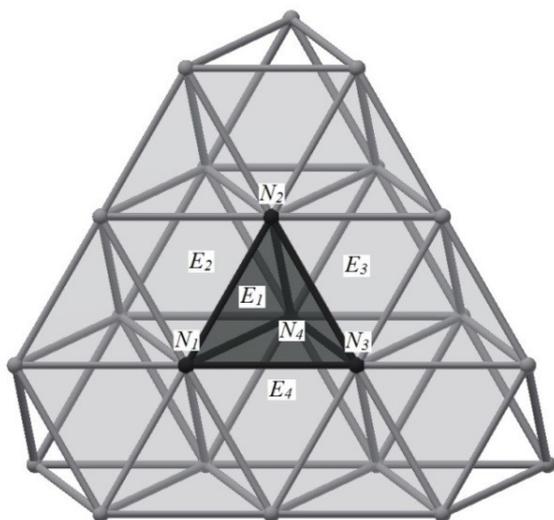


Рис. 1. Трехмерная конечно-элементная сетка
Fig. 1. 3D finite element mesh

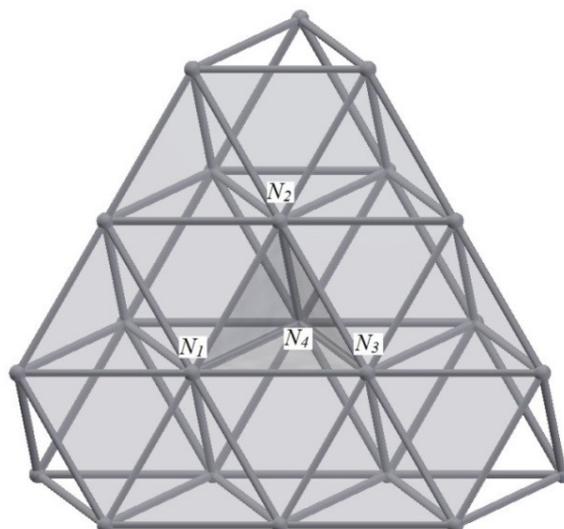


Рис. 2. Трехмерная конечно-элементная сетка после удаления элемента
Fig. 2. 3D finite element mesh after removal of element

элементная сетка разбивается на N областей. Поиск смежной грани для i -го элемента осуществляется сначала по области, которой он принадлежит, потом по смежным областям. Максимальное число областей, по которым может идти поиск смежного элемента, равно 27. Области поиска были распределены по максимальной возможности попадания в нее смежного элемента, и процесс перебора двигался по областям согласно следующему порядку:

- область, которой принадлежит элемент (главная, вариант a);
- группа областей, которые имеют с главной общую грань (6 областей, вариант b);
- группа областей, которые имеют с главной общее ребро (12 областей, вариант c);
- группа областей, которые имеют с главной областью общий узел (8 областей, вариант d).

2. Обсуждение результатов

В работе представлены результаты исследований для тела, имеющего форму куба с ребром 1 м, который разбит на 5.3 млн конечных элементов. Диаграмма, показывающая количество элементов, попавших в каждую из групп областей, приведена на рис. 3. Как видно, уменьшение размеров области приводит к увеличению вероятности того, что элементы могут найти смежную грань уже в другой области. А так как алгоритм поиска последовательно проходит по всем областям, нахождение смежной грани в другой области приводит к тому, что расчетное время увеличивается за счет дополнительных переборов областей. Но такой вариант алгоритма гарантирует нахождение смежных граней для каждого элемента.

Прирост производительности обуславливается существенным уменьшением числа вариантов перебора. Если до оптимизации число переборов составляло $8 \cdot N_э^2$, где $N_э$ — количество конечных элементов (четыре грани каждого элемента сравнивались с четырьмя гранями всех остальных элементов). После оптимизации алгоритма данное число не может превышать $27 \cdot 4 \cdot N_{об} \cdot N_{э}^2$, где $N_{об}$ — число областей, $N_{э}$ — количество элементов в текущей области, т. е. сравниваются между собой только грани элементов

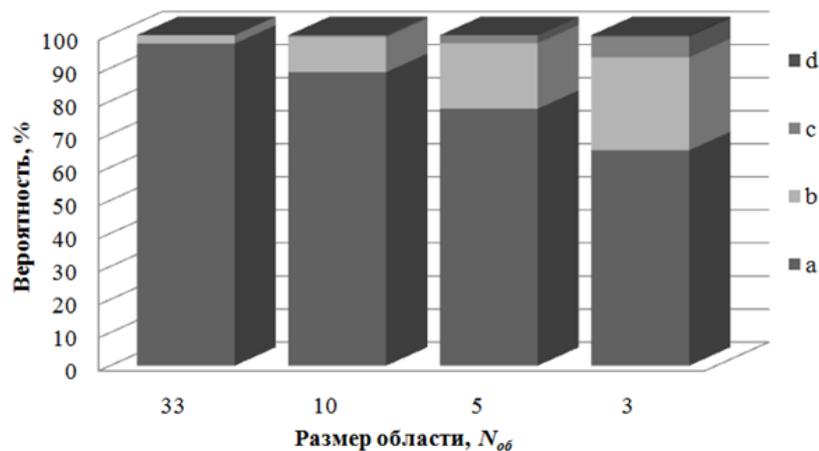


Рис. 3. Зависимость вероятности попадания элемента в определенные области поиска от размеров области

Fig. 3. Dependence of the probability of an element entering certain search areas on the size of the area

внутри области, и в том случае, если смежная грань не будет найдена, поиск продолжится по смежным областям.

Для расчетной сетки, которую поделили на 1000 областей ($N_{об} = 1000$), количество элементов в одной области будет примерно в 1000 раз меньше, чем количество элементов во всем теле ($N_э/N_{эо} = N_{об}$). Число итераций до оптимизации $8 \cdot (5 \cdot 10^6)^2 = 2 \cdot 10^{14}$. Максимальное число итераций после оптимизации: $27 \cdot 4 \cdot 1000 \cdot (5 \cdot 10^3)^2 = 2.7 \cdot 10^{12}$. После оптимизации алгоритм будет выполняться как минимум в 74 раза быстрее.

Необходимо учитывать, что оптимизированный алгоритм тратит дополнительное процессорное время на разбиение областей. И это время растет вместе с увеличением количества областей (рис. 4). Количество областей вдоль каждого измерения обозначим соответственно N_x , N_y , N_z . В данном примере количество областей вдоль каждого измерения одинаково, примем обозначение N_{xyz} . При разбиении на 125 000 ($50 \cdot 50 \cdot 50$) областей для сетки в 5.3 млн элементов время подготовки составляет около 90 с.

На рис. 5 приведено время, которое необходимо потратить на алгоритм поиска смежных граней после оптимизации на рабочей станции с четырьмя шестнадцатядерными ЦП AMD Opteron 6376.

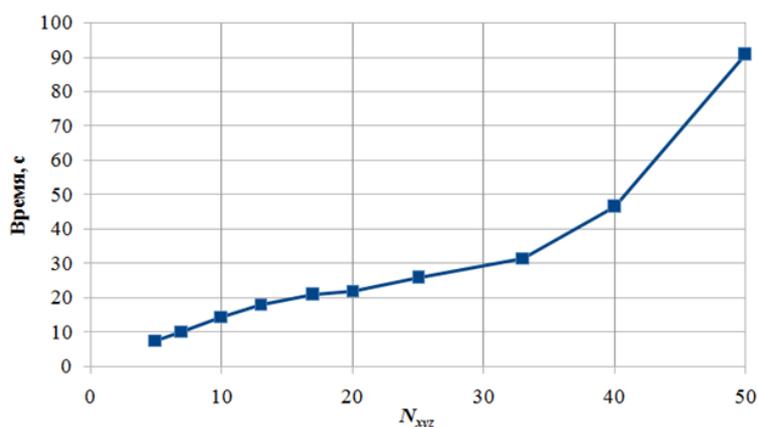


Рис. 4. Процессорное время на подготовку данных о всех областях

Fig. 4. CPU time for preparing data on all areas

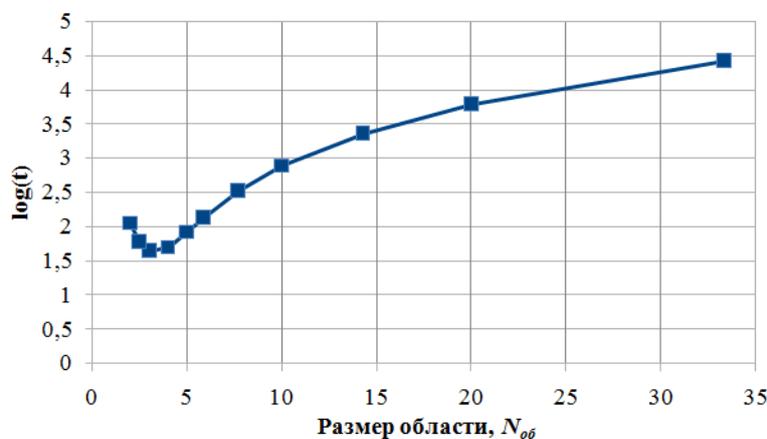


Рис. 5. Время расчета алгоритма поиска смежных граней после оптимизации

Fig. 5. The calculation time of the algorithm for searching adjacent planes after optimization

Наибольший прирост производительности достигается при размере области, равном трем шагам сетки по пространству. С увеличением размера области сокращается время подготовки данных для алгоритма, но оно меньше, чем увеличение времени поиска смежной грани, соответственно и общее время алгоритма увеличивается.

На рис. 6 приведена зависимость времени, которое необходимо потратить на алгоритм поиска смежных граней для расчетных сеток, от количества конечных элементов. Количество областей вдоль каждого измерения равняется 33. Из графика видно, что увеличение времени счета с увеличением количества элементов в сетке происходит практически линейно. Но, надо заметить, что оптимальное время счета при увеличении количества элементов расчетной сетки может быть достигнуто при разбиении вдоль каждого измерения, отличным от 33. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Экспериментальные исследования по взаимодействию ударников с разнесенными преградами проводились в КБМ машиностроения, г. Коломна [8]. Они заключались в метании ударника в форме шара из стали ШХ15 диаметром 12.7 мм по преграде из сплава Д16Т толщиной 4.9 мм. Начальная скорость ударника 1001 м/с, вектор скорости составлял угол с нормалью к преграде 60 град.

Численные расчеты основывались на математической модели поведения металлов и сплавов при импульсном нагружении [8]. Моделирование процесса взаимодействия проводилось в полной трехмерной постановке методом конечных элементов в модификации Джонсона [9]. При численном моделировании в программном комплексе EFES [10] все условия взаимодействия и свойства материалов соответствовали экспериментальным. В результате взаимодействия как в ударнике, так и в преграде возникают напряжения, приводящие к разрушению конечных элементов. После этого конечный элемент может пройти процедуру эрозионного разрушения, если этот элемент имеет хотя бы одну поверхностную грань. Были проведены расчеты с использованием алгоритма эрозионного разрушения и получены расчетные конфигурации взаимодействующих тел (рис. 7). Использование предложенного алгоритма позволило сократить время подготовки дан-

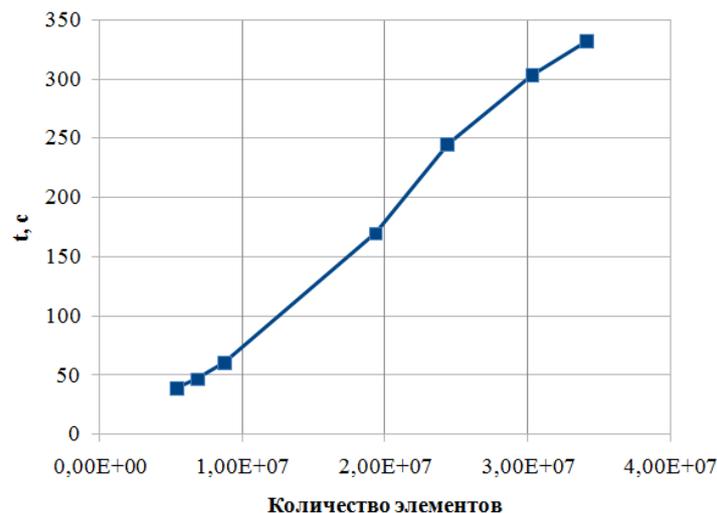


Рис. 6. Время расчета алгоритма поиска смежных граней для различного числа конечных элементов

Fig. 6. The calculation time of the algorithm for searching adjacent planes for a different number of finite elements

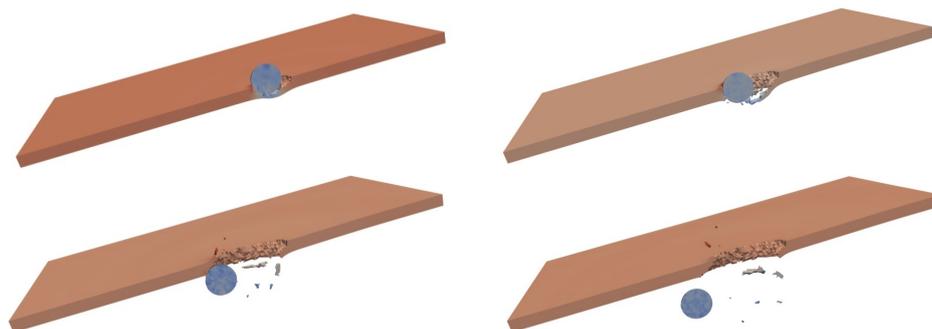
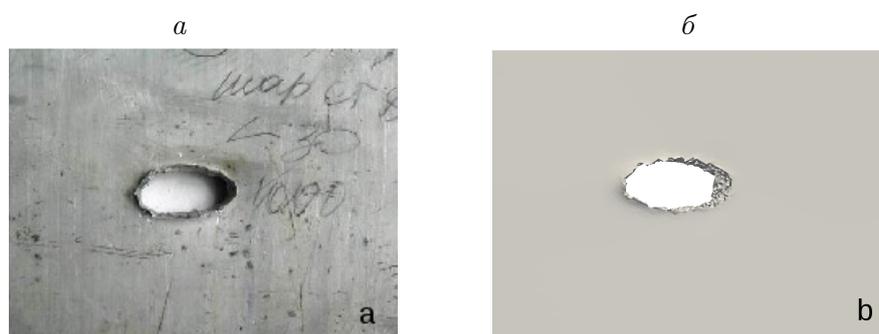


Рис. 7. Расчетные конфигурации ударника и преграды

Fig. 7. Design configurations of the striker and obstacle

Рис. 8. Вид преграды после пробития ее ударником: *a* — эксперимент, *б* — расчетFig. 8. Shape of obstacle after breaking through by the striker: *a* — experiment *б* — calculation

ных для алгоритма эрозионного разрушения с 1091 до 12 с. Расчеты наглядно иллюстрируют динамику разрушения преграды и формирование осколочного поля на тыльной поверхности преграды. На рис. 8 показаны экспериментальное и расчетное отверстия в преграде после взаимодействия с ударником.

Наблюдается хорошее качественное и количественное соответствие экспериментальных и численных результатов. Наибольший диаметр отверстия в эксперименте составил 26.6 мм, в расчете — 26.9 мм (расхождение $\delta = 1.1\%$). Скорость ударника после пробития преграды составила 843 м/с, в расчете 846 м/с ($\delta = 0.4\%$). Благодаря использованию алгоритма эрозионного разрушения, а именно образованию новых поверхностных граней, ударник имеет возможность взаимодействовать не только с самым первым слоем конечных элементов в преграде, но и с элементами по всей толщине преграды, что видно из рис. 8.

Выводы

- Применение алгоритма эрозионного разрушения необходимо для корректного описания процессов развития разрушения при высокоскоростном взаимодействии твердых тел.
- Разбиение расчетной сетки на области дает существенный прирост производительности при подготовке данных для алгоритма эрозионного разрушения.
- Уменьшение размеров области приводит к тому, что относительное количество элементов, попавших в главную область, уменьшается, что отрицательно влияет на процессорное время.

- Время, затраченное процессором на подготовку данных, необходимо учитывать, но оно вносит меньший вклад в общее время по сравнению с самими итерациями по поиску смежных граней конечных элементов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-48-700035 и 18-41-703003) и государственного задания на проведение научных исследований (проект № 9.6814.2017/БЧ).

Список литературы

- [1] **Ренев С.А., Шелофаст В.В.** Решение задач прочности и трещиностойкости с использованием модифицированной функции “birth and death” для трех типов деформации в вершине трещины. Морские интеллектуальные технологии. 2017; 3(4):72–78.
 - [2] **Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е.** Конечно-элементное моделирование процессов разрушения и оценка ресурса элементов автодорожного моста с учетом коррозионных повреждений. Инженерно-строительный журнал. 2012; (7):32–42. DOI: 10.5862/МСЕ.33.4.
 - [3] **Ядров В.И.** Моделирование роста поверхностной трещины под действием циклической нагрузки в программе Ansys. Омский научный вестник. 2014; 3(133):152–156.
 - [4] **Лукашевич А.А.** Моделирование контактного взаимодействия и разрушения упруго-деформируемых твердых тел при действии жесткого индентора. Вестник ТОГУ. 2007; 1(4):69–82.
 - [5] **Андрэ Х., Глущенко О.Н., Иванов Е.Г., Кудрявцев А.Н.** Автоматическое параллельное построение тетраэдральных сеток с помощью декомпозиции расчетной области. Журн. вычисл. математики и матем. физики. 2008; 48(8):1448–1457. <https://doi.org/10.1134/S0965542508080083>
 - [6] **Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V.** Specific aspects of erosion fracture description during numerical simulation of shock impact. AIP Conference Proceedings. 2018. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5065273>
 - [7] **Радченко П.А.** Алгоритм расчета контактных границ с учетом эрозии конечных элементов при высокоскоростном взаимодействии тел. Вестн. Тамбовского ун-та. Сер.: Естественные и технические науки. 2016; 21(3):1275–1277. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1275-1277
 - [8] **Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В., Тукаев А.М.** Численное и экспериментальное исследование разрушения разнесенных преград при ударе. Вестн. Тамбовского ун-та. Сер.: Естественные и технические науки. 2016; 21(3):1278–1281. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1278-1281
 - [9] **Johnson G.R.** Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions. Journal of Applied Mechanics. 1981; 48(1):30–34.
 - [10] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614671. Российская Федерация. Трехмерное моделирование деформации и разрушения гетерогенных материалов при динамических нагрузках (EFES 1.0) / Радченко П.А., Батуев С.П., Радченко А.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ТГАСУ (RU). № 2014612050; заявл. 12.03.14; опубл. 06.05.14, Реестр программ для ЭВМ.
-

Adaptation algorithm for the finite element mesh in the problems of the fracture of solids under dynamic loads

RADCHENKO PAVEL A., BATUEV STANISLAV P., RADCHENKO ANDREY V., VIK KSENIYA V.

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk 634003, Russia

Corresponding author: Batuev Stanislav P., e-mail: spbatuev@gmail.com*Received December 25, 2018, revised October 15, 2019, accepted December 23, 2019***Abstract**

The present work suggests algorithm enabling to adequately describe fracture of materials and structures under impulse loading. The methodology of reconfiguration finite element mesh with re-computation of concentrated masses in nodes is considered. The algorithm uses all the capabilities of modern parallel computing to the full extent and can be easily scaled for all possible objectives. There are various approaches to implement surface erosion of interacting bodies under high-velocity loading. Authors used the approach for which in the case when one or several nodes of the fractured element no longer belong to the other elements, then their mass is equally distributed between the remaining nodes of this element (erosion fracture algorithm). The most time-consuming part of the algorithm of erosion fracture is searching of adjacent planes of elements. In order to accelerate data, preparation for erosion fracture algorithm searching algorithm of adjacent planes of elements was optimized. Optimization was performed using the method of sorting of all planes for all elements and their correlation with each other. The exact optimization of the algorithm includes the following steps: initially all finite element mesh is divided into N areas and searching for the adjacent plane for the element “ i ” is at first performed in the area it belongs to and then it proceeds to adjacent areas, the maximum number of areas where the search of adjacent element can be performed is 27. The areas for search were defined according to the maximum capability of an adjacent plane to get into it. Unfortunately, not the entire program code can be realized simultaneously, there are some areas which require consequent calculation, therefore, improvement of the performance with the increased number of cores is non-linear. However, along with the increase in the size of computation mesh the efficiency of using larger number of cores grows significantly. Application of erosion fracture algorithm is required for appropriate description of the processes of fracture propagation under high-velocity interaction of solid bodies. Dividing the computation mesh into areas provides significant performance improvement for erosion fracture algorithm during the data preparation stage. Decrease in the size of area results in reduced relative number of elements getting into the main area, which influences negatively the processing time. Time which the processor spends on data preparation should be taken into account, it still contributes to the total time to the less extent as compared to the iterations on searching the adjacent planes of finite elements.

Keywords: high-speed interaction, deformations, fracture, model of the materials behavior, numerical modeling, finite element method, parallel computing.

Citation: Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V., Vik K.V. Adaptation algorithm for the finite element mesh in the problems of the fracture of solids under dynamic loads. Computational Technologies. 2020; 25(1):82–90. (In Russ.)

Acknowledgements. This research was partly supported by RFBR (grant No. 18-48-700035, No. 18-41-703003) and State assignment for research, project No. 9.6814.2017.

References

1. Renev S.A., Shelofast V.V. Method for solving of strength and fracture toughness problems using the modified “birth and death” function for three modes of deformation at the tip of a crack. *Marine Intelligent Technologies*. 2017; 3(4):72–78. (In Russ.)
2. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.E. Finite element modeling of fracture processes and estimation of durability of the road bridge with account of corrosion damages. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; (7):32–42. DOI: 10.5862/MCE.33.4. (In Russ.)
3. Yadrov V.I. Modeling the growth of crack surface under cyclic loading by means of software ANSYS. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014; 3(133):152–156. (In Russ.)
4. Lukashovich A.A. Simulating contact interaction and fracturing elastic-fragile solids by a rigid indenter. *Bulletin of Pacific National University*. 2007; 1(4):69–82. (In Russ.)
5. Andrä H., Glushchenko O.N., Ivanov E.G., Kudryavtsov A.N. Automatic parallel generation of tetrahedral grids by using a domain decomposition approach. *Comput. Math. and Math. Phys.* 2008; 48(8):1367–1375. <https://doi.org/10.1134/S0965542508080083>
6. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V. Specific aspects of erosion fracture description during numerical simulation of shock impact. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Available at: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5065273>
7. Radchenko P.A. Algorithm of calculation of contact boundaries taking into account the erosion of finite elements at high-velocity interaction of bodies. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016; 21(3):1275–1277. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1275-1277. (In Russ.)
8. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V., Tukayev A.M. Numerical and experimental investigation of fracture of the spaced barriers under impact. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016; 21(3):1278–1281. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1278-1281. (In Russ.)
9. Johnson G.R. Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions. *Journal of Applied Mechanics*. 1981; 48(1):30–34.
10. Certificate of state registration of computer program No. 20144614671. Russian Federation. Three-dimensional modelling for deformation and fracture of heterogeneous materials under dynamic loads (EFES 1.0) / Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V.; Applicant and copyright holder TSUAB (RU). No. 2014612050; declared 12.03.14; publ. 06.05.14, Register of computer programs. (In Russ.)