

УДК 519.6
DOI 10.53403/9785951505071_2022_103

ДВУМЕРНЫЕ И ТРЕХМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ПО МЕТОДИКЕ ТИМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ВЗРЫВНОГО РЕЗАКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА УДАРНЫХ ВОЛН РАЗРЕЖЕНИЯ ДЛЯ РЕЗКИ ТРУБ

*Л. Я. Габзетдинова, И. Г. Новиков, Т. Н. Половникова, А. В. Самодолов,
И. В. Шиберин, И. В. Занегин, А. Н. Катыков*

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Объектом исследования является подход проведения численного моделирования работы взрывного резака в трехмерной постановке по лагранжевой методике ТИМ. В докладе приведены результаты расчетов работы взрывного резака для резки труб изнутри в двумерной и трехмерной постановках. Показано сравнение полученных результатов между собой и сравнение с экспериментальными данными. Трехмерные расчеты проведены с использованием смешанных ячеек, появляющихся на границах раздела разных веществ, двумерный расчет проведен без смешанных ячеек с явно выделенными подвижными контактными границами. Целью работы является отработка подхода проведения подобного класса расчетов в трехмерном случае, влияния смешанных ячеек на результаты расчетов.

Ключевые слова: трехмерные и двумерные расчеты, численное моделирование, методика тим, взрывной резак, резка труб изнутри, смешанные ячейки.

Трехмерные и двумерные расчеты, численное моделирование, методика ТИМ, взрывной резак, резка труб изнутри, смешанные ячейки

В РФЯЦ-ВНИИЭФ для резки толстостенных стальных опор предложен сотрудниками ИФВ метод [1, 2], основанный на образовании и взаимодействии ударных волн разрежения (УВР) в железе или стали [3]. Работоспособность этого метода при резке толстостенных стальных конструкций была показана более 10 лет назад.

Причиной образования ударных волн разрежения в железе является наличие аномального участка адиабаты разгрузки в области (α -Fe \Leftrightarrow ϵ -Fe) фазового перехода [4, 5]. При взаимодействии двух ударных волн разрежения растягивающие напряжения возникают в очень узкой зоне материала, определяемой шириной фронта УВР, что приводит к образованию «гладкой» поверхности откола. Подобный характер носит разрушение стальной подложки в зоне столкновения на ее поверхности двух направленных навстречу друг другу детонационных волн (ДВ) в слое взрывчатого вещества (ВВ), размещенном в контакте с этой подложкой.

В данной работе проведено численное моделирование работы взрывного резака для резки изнутри стальной трубы диаметром 762 мм и толщиной стенок 51 мм. Расчеты проводились в двух постановках. В первом случае использовалось двумерное приближение задачи. А во втором – трехмерное. В трехмерном случае рассмотрен в силу симметрии задачи сектор в 120 градусов, состоящий участка трубы и двух элементов взрывного резака. Также приведены результаты трехмерной задачи, где моделировалась нештатная работа взрывного резака с инициированием части ВВ.

Полученные результаты расчетов сравнивались с результатами экспериментов, проведенных в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Численное моделирование выполнено с помощью методики ТИМ [6, 7], предназначенной для решения задач газодинамики, теплопроводности, магнитной гидродинамики с учетом диффузии магнитного поля, нестационарной упругопластичности с учетом разрушения материалов, детонации взрывчатых веществ на неструктурированных многоугольных/многогранных лагранжевых сетках. По методике ТИМ допускается расчет с применением смешанных ячеек, как задач с осевой симметрией в цилиндрической системе координат (двумерные задачи), так и полноценных трехмерных задач в декартовой системе координат. Трехмерный расчет проведен с использованием смешанных ячеек в автоматическом режиме счета без вмешательства пользователя и остановки счета.

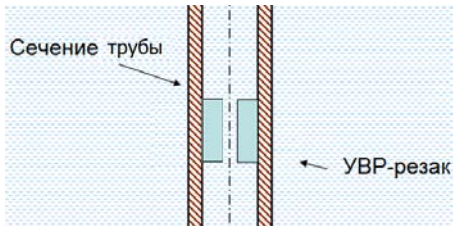
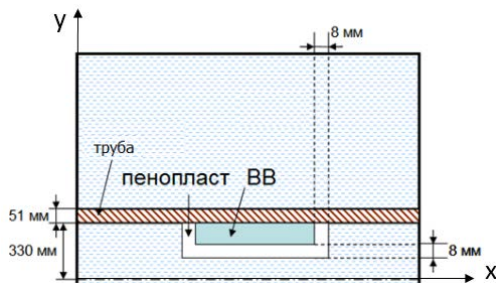


Рис. 1. Общий вид задачи

Общий вид задачи представлен на рис. 1. Данная задача может быть сведена к двумерному случаю для численного моделирования в цилиндрической системе координат, рассматривая сечение половины геометрии с осью вращения ОХ. В данном случае элемент шашки будет представлен в виде тора. На рис. 2 схематично приведена двумерная геометрия задачи.



Вещества	Плотность, г/см ³
Железо (опора)	7.85
ВВ	1.6
Пенопласт	0.7

Рис. 2. Двумерная геометрия задачи и описание веществ

Размер ВВ составлял 70×14 мм. Уравнения состояния веществ были взяты в форме Ми-Грюнайзена. Для учета упругопластических свойств трубы использовалась модель Глушака [8] в сочетании с моделью разрушения «хрупкий откол», значение $P_{отк} = -1.4$ ГПа.

Устройство УВР-резака для внутренней резки труб состоит из 6 элементов взрывного резака, расположенных последовательно с небольшим зазором. Поэтому для более точного численного моделирования необходимо использовать трехмерное приближение задачи. Также рассматривая трехмерную задачу появляется возможность изучения нештатной работы взрывного резака, связанной с разновременностью инициирования ВВ либо с отказом инициирования части ВВ.

Общий вид трехмерной геометрии приведен на рис. 3.

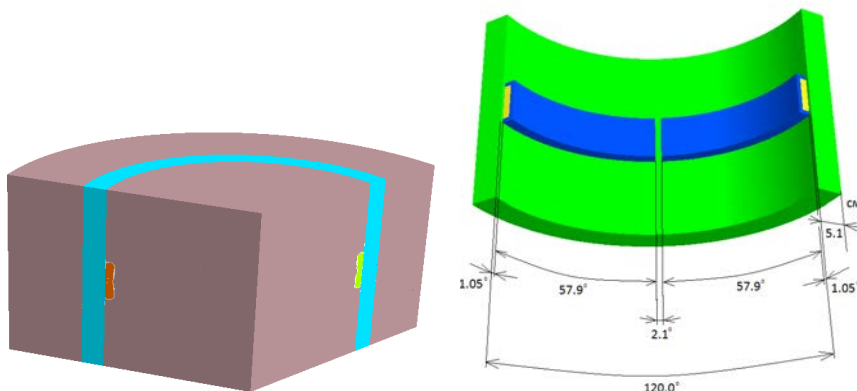


Рис. 3. Общий вид трехмерной геометрии

Счетная сетка расставлялась с учетом особенностей геометрии и выделения зон измельчения в районе образования трещины. Минимальный размер ячеек составлял ~ 0.01 см. Общее количество ячеек в двумерной задаче составляло около 1.2 млн, в трехмерной ~ 50 млн.

Расчет детонации проводился по модели Чепмена-Жуге с контролем над скоростью распространения фронта детонационной волны. Инициирование ВВ осуществлялось в двух нижних точках в двумерном случае и вдоль кривых (см. рис. 4) в трехмерном случае. В трехмерном случае рассмотрен расчет двух вариантов задачи: со штатным инициированием двух ВВ и вариант инициирования у одного из ВВ половины его части.

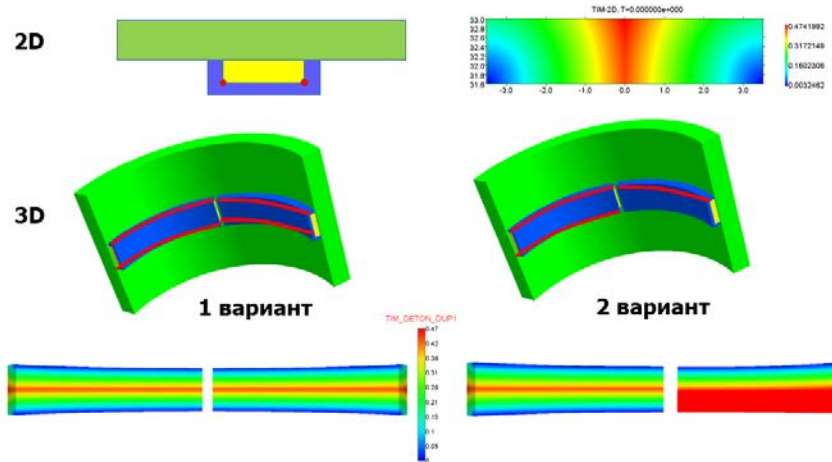


Рис. 4. Инициирование ВВ

Результаты расчетов приведены в виде распределения поля давлений (ГПа) и плотностей (г/см^3). В трехмерном случае приведены сечения плоскостями (см. рис. 5), проходящие через середину ВВ.

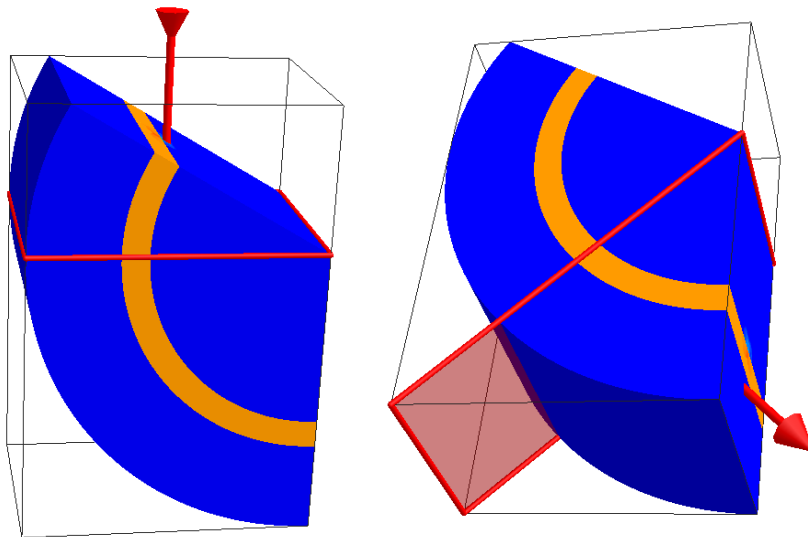


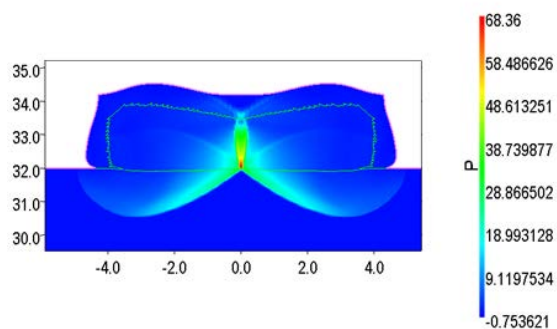
Рис. 5. Сечение плоскостью

На рис. 6 приведено распространение детонационной волны на момент времени 4.68 мкс. Максимальное давление, возникающее в трубе, на момент времени схождения детонационных волн, составляет ~ 70 ГПа.

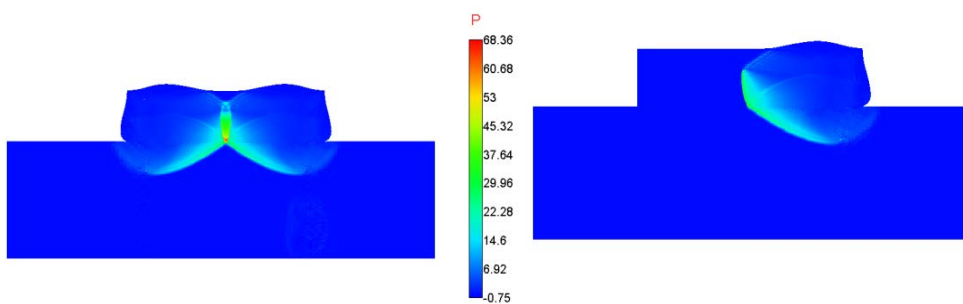
Динамика зарождения откола в трубе для расчетов представлена на рис. 7–10 в виде распределений плотностей (г/см^3) на различные моменты времени.

2D

TIM-2D. T=0.468282



3D



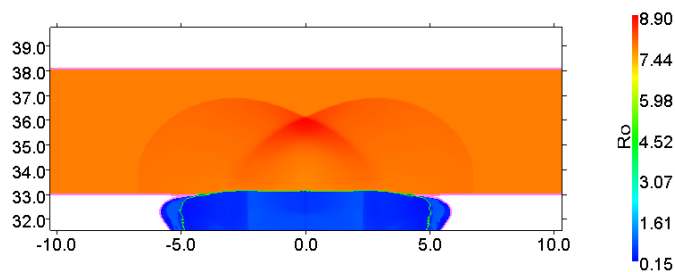
Вариант 1

Вариант 2

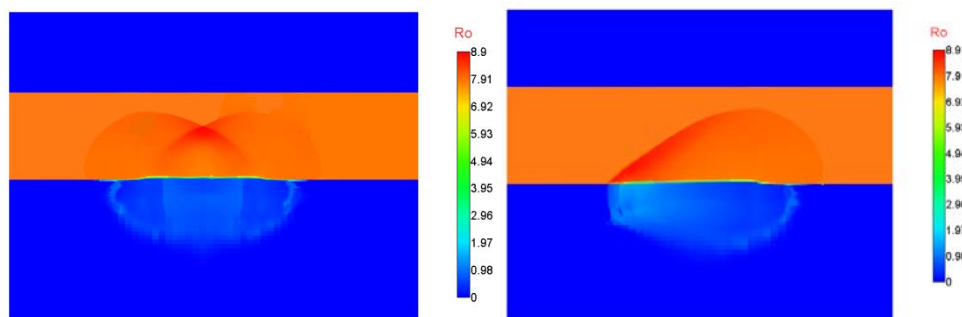
Рис. 6. Распространение детонационной волны, поле давлений (ГПа), момент времени 4.68 мкс

2D

TIM-2D. T=1.000085



3D



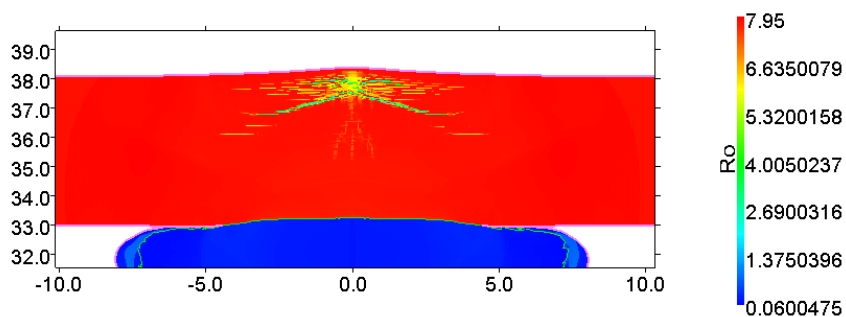
Вариант 1

Вариант 2

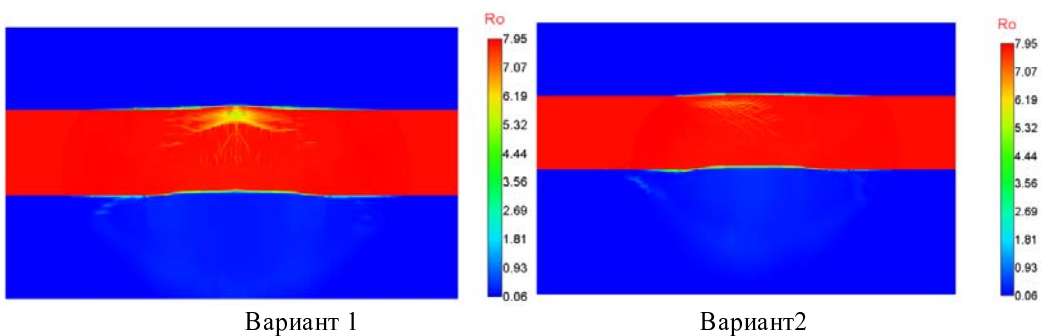
Рис. 7. Распределение поля плотности (г/см^3), момент времени 10 мкс

2D

TIM-2D. T=2.000084



3D



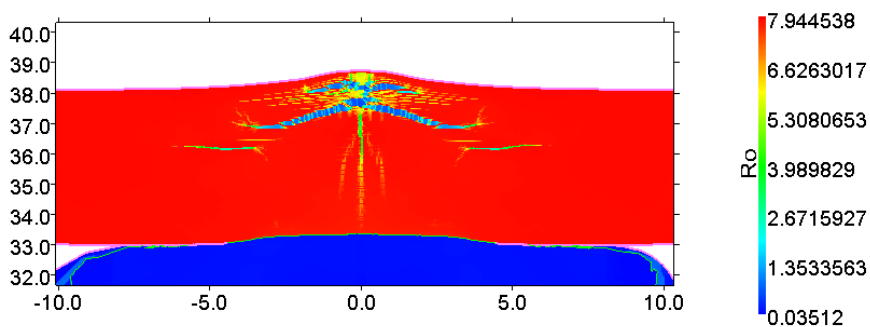
Вариант 1

Вариант 2

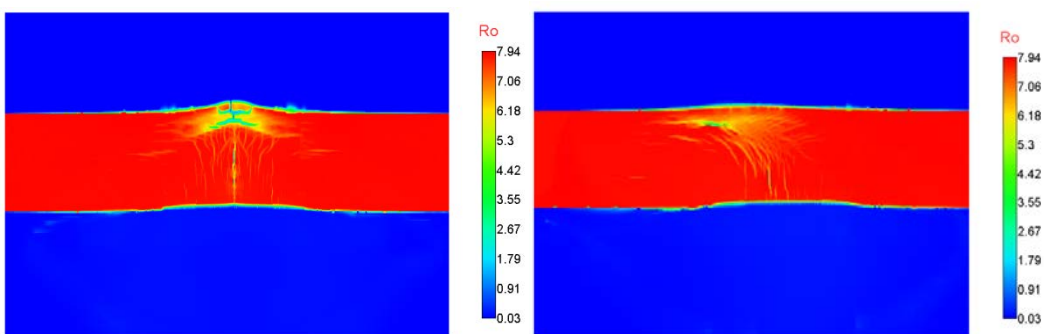
Рис. 8. Распределение поля плотности (г/см^3), момент времени 20 мкс

2D

TIM-2D. T=3.000149



3D

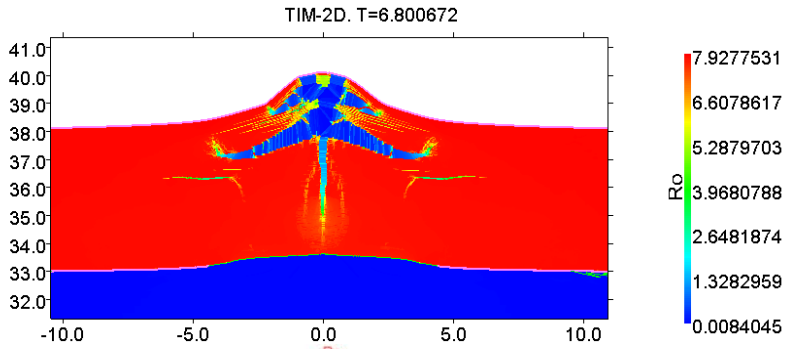


Вариант 1

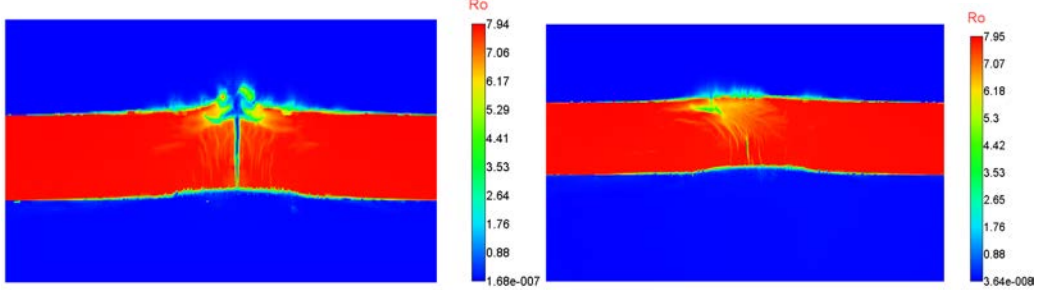
Вариант 2

Рис. 9. Распределение поля плотности (г/см^3), момент времени 30 мкс

2D



3D

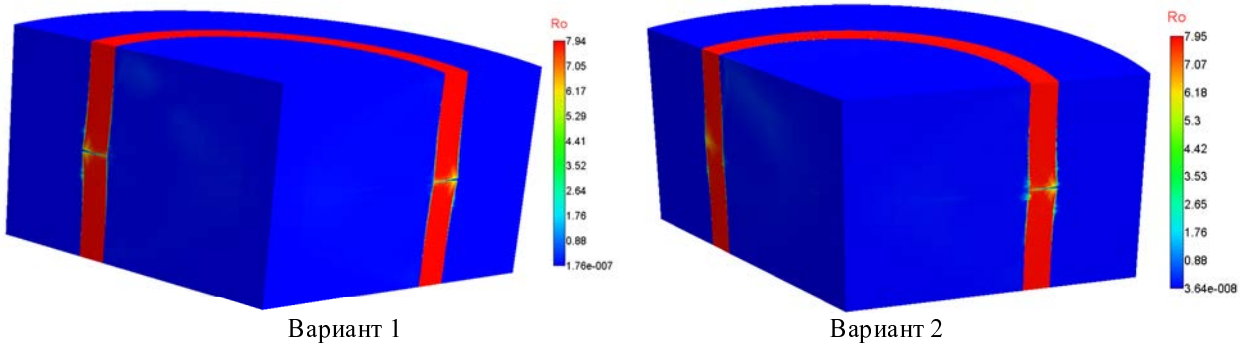


Вариант 1

Вариант 2

Рис. 10. Распределение поля плотности ($\text{г}/\text{см}^3$), момент времени 68 мкс

На рис. 11 приведен общий вид трехмерной геометрии на момент окончания счета.



Вариант 1

Вариант 2

Рис. 11. Общий вид трехмерной геометрии на момент окончания счета

Анализ проведенных расчетов показывает, что при штатной работе в двумерном и трехмерном случае наблюдается полный разрыв трубы (следовательно, моделирование можно проводить в упрощенной двумерной постановке). Моделирование нештатной ситуации инициированием только части одного из ВВ приводит к частичному разрушению трубы, полного разрыва не наблюдается, задача приобретает полностью трехмерный характер. Наличие смешанных ячеек не оказывает заметного влияния на характер разрушения трубы и формирование зоны гладкого откола.



Рис. 12. Эксперимент

Проведенный эксперимент в ИФВ показывает полное разрушение трубы, центральная часть фрагмента трубы в месте размещения взрывного резака разрушена на куски по диаметру. На месте проведения опыта обнаружены две крупные части разрезанной трубы, рис. 12.

Выводы

Проведенные расчеты показывают хорошее согласие двумерных и трехмерных расчетов с экспериментальными данными. Показан возможный вариант развития нештатной ситуации с отказом работы одной из части ВВ, в результате чего полного разделения трубы не наблюдается.

В результате проведенных трехмерных расчетов, был отработан подход, когда вся область считается в лагранжевом представлении с применением смешанных ячеек. Основная проблема при проведении подобного класса расчетов – это сильное искажение сетки в зоне тыльного откола. Введение оптимизации сетки во фрагментах или во всей математической области позволяет применять автоматическую коррекцию сетки. Используется глобальный пересчет величин на определенные этапы в задаче (по достижению критериев качества сетки, вырабатываемых в блоке локальной перестройки сетки в автоматическом режиме) и локальное исправление сетки с пересчетом величин (в небольших зонах задачи, где сетка подвержена максимальным деформациям). В результате перестроения на границе раздела веществ появляются смешанные ячейки. Между этапами глобального пересчета величин не допускается перетекание вещества из ячейки в ячейку, т. е. счет ведется в лагранжевом представлении. Данный подход позволяет решать задачи без ручного вмешательства пользователя в расчеты, что снижает риск влияния «человеческого фактора» на получаемое решение задач. Помимо автоматизации, за счет выделения зон измельчения счетной сетки с последующей ее динамической адаптацией под решение удастся существенно экономить на общем количестве точек и, как следствие, занимать существенно меньшие вычислительные ресурсы, нежели при использовании равномерной расстановки сетки во всей области задачи. Проведенные расчеты показывают применимость методики ТИМ для проведения подобных классов расчетов с учетом смешанных ячеек.

Литература

1. Устройство для внутренней взрывной резки труб. Свидетельство на полезную модель № 7195 от 25.03.97. Батьков Ю. В., Новиков С. А. и др. БИ № 7, 1998.
2. Способ резки конструкций и генератор взрывной волны. Патент РФ № 2105946. БИ № 6. Батьков Ю. В., Новиков С. А., Сеницына Л. М. 1998.
3. Новиков С. А. Взрывные технологии и конверсия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Импульсные реакторы и простые критические сборки. 1994. Вып. 2. С.40–47.
4. О возможности ударных волн разрежения. ЖЭТФ. Зельдович Я. Б. 1946. Вып. 4. С. 363–364.
5. Об ударных волнах разрежения в железе. ЖЭТФ. Иванов А. Г., Новиков С. А. 1961. Вып. 6. Т. 40. С. 1879–1882.
6. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 2. С. 37–52.
7. Соколов С.С., Воропинов А.А., Новиков И.Г., и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. С. 29-43.
8. Глушак Б. Л., Новиков С. А., Батьков Ю. В. Определяющее уравнение Al и Mg для описания высокоскоростного деформирования УВ // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 1.

2D AND 3D COMPUTATIONS OF THE SIMULATED OPERATION OF THE EXPLOSIVE CUTTER ON THE BASIS OF THE RAREFACTION WAVES TO CUT PIPES WITH IMPLEMENTATION OF TIM-METHOD

*L. Ya. Gabzetdinova, I. V. Zanegin, A. N. Katykov, I. G. Novikov, T. N. Polovnikova,
A. V. Samodolov, I. V. Shiberin*

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

An approach to numerical simulation of the explosive cutter operation in 3D using Lagrangian TIM-method is under investigation. The work describes computational results for the operation of an explosive cutter to cut pipes from inside in 2D and 3D setup. The results are compared with each other and with experimental data. 3D computations were carried out using mixed cells that appear at the interfaces of different materials, 2D computations were performed without mixed cells with explicit moving contact boundaries. The goal of the work is polishing the approach to the performance of this class of computations in 3D case and the analysis of the influence of mixed cells on computational results.

Key words: 3D and 2D computations, numerical simulation, TIM-method, explosive cutter, cutting pipes from inside, mixed cells.