

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БРОНЕБОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ УДАРНИКА НА ПРЕГРАДУ ПО МЕТОДИКЕ ТИМ

*А. В. Свидинский, С. С. Соколов, И. Г. Новиков, А. В. Самодолов, Т. Н. Половникова*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В данной работе представлены результаты численного моделирования броневой бойного действия ударника на преграду по методике ТИМ. Показано сравнение полученных результатов трехмерных расчетов, проведенных с использованием смешанных ячеек и без их использования с результатами двумерных расчетов без использования смешанных ячеек и с имеющимися экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* трехмерные и двумерные расчеты, численное моделирование, методика тим, ударник, преграда, смешанные ячейки.

Полномасштабные опыты для экспериментальной проверки бронепробития при варьировании всех параметров (скорость, материал преграды, толщина преграды, угол подхода и угол атаки ударника) делают эту работу чрезвычайно затратной. Поэтому для обоснования выбора того или иного ударника и скорости подхода к преграде и для предварительной оценки величины бронепробития целесообразно использование численного моделирования. В ряде случаев расчет таких задач возможно свести к двумерной постановке, однако рассматривая углы подхода ударника к преграде отличные от нуля, задача становится трехмерной.

Для численного моделирования используется лагранжевая методика ТИМ. Численное моделирование на подвижной сетке с явно выделенными лагранжевыми границами между веществами сопряжено с рядом трудностей: сетка может искажаться в трех направлениях, возникают вихревые и струйные движения. Все это может приводить к существенному искажению сетки и как следствие этого – к невозможности дальнейшего численного моделирования на ней. Необходимо останавливать расчет для перестроения сетки вручную. Подход с использованием смешанных ячеек значительно повышает автоматизацию проведения трехмерных расчетов и позволяет применять аппарат перестроения сетки без остановки расчета. Наиболее актуально данный вопрос встает при проведении трехмерных расчетов конструкций, связанных со сложными вихревыми и струйными течениями. Появление смешанных ячеек возможно только на границах раздела веществ после перестроения сетки, сам расчет между этапами пересчета величин проводится в лагранжевом приближении без допущения перетекания веществ между ячейками. На данный момент в методике ТИМ реализован аппарат поддержания качества сетки, который основан на автоматическом выделении фрагмента, в котором сетка подвержена сильным деформациям, с последующим изменением сетки в этом фрагменте и переинтерполяции величин, реализован аппарат глобального пересчета величин на определенные этапы по достижению критериев качества сетки, вырабатываемых в блоке локальной перестройки сетки в автоматическом режиме.

В данной работе представлено применение подхода с использованием смешанных ячеек и автоматического перестроения сетки в процессе счета на примере задачи о пробивании преграды. Приведено сравнение результатов расчетов с использованием смешанных ячеек и без их использования. Воздействие ударника на преграду характеризуется углом его подлета к преграде, поэтому численное моделирование в ряде случаев представляет строго трехмерную задачу. Численное моделирование

проведено для бронебойного действия цилиндрического ударника диаметром 1 см и длиной 26 см из тяжелого сплава (ВНЖ–сплав вольфрама, никеля и железа) при скорости проникания от 0,6 до 1,3 км/с в преграду из брони средней твердости по лагранжевой методике ТИМ [1, 2]. Преграда представляла собой незакрепленную квадратную плиту со стороной 40 см, расположенную таким образом, чтобы вектор скорости ударника из центра масс проходил через центр плиты.

В начале рассмотрим сравнение расчетов в двумерной и трехмерной постановке на примере расчета лобового удара на полное пробитие со смешанными ячейками и без. Далее рассмотрим существенно трехмерную задачу.

Рассматривается вариант расчета пробития ударником преграды с углом подхода  $0^\circ$  и углом атаки  $0^\circ$  со скоростью 0,6 км/с, толщина преграды составляла 2,5 см. Начальная геометрия представлена на рис. 1.



Рис. 1. Начальная геометрия

Расчеты выполнялись в двумерной и трехмерной геометрии. В трехмерном случае были рассмотрены несколько вариантов построения счетной сетки, учитывающие особенности проникания ударника в преграду с измельчением сетки в области пробития и в самом ударнике. Изначально была построена двумерная геометрия [3, 4] и затем путем ее трансляции получена трехмерная.

Первый вариант построения трехмерной геометрии

Второй вариант построения трехмерной геометрии

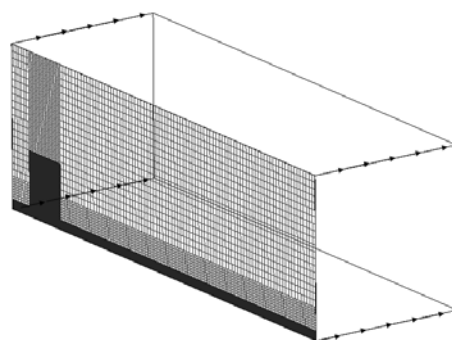
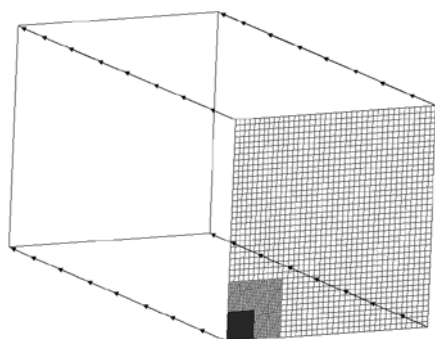


Рис. 2. Трехмерная геометрия

Количество ячеек в задаче составляло около 5,8 млн в первом варианте и 19,6 млн во втором. Характерный размер ячеек в ударнике – 0,03 см. Пространство вокруг ударника и преграды заполнялось воздухом.

Распределение плотностей в расчете, проведенном без использования смешанных ячеек, на моменты времени 100 и 300 мкс представлены на рис. 3.

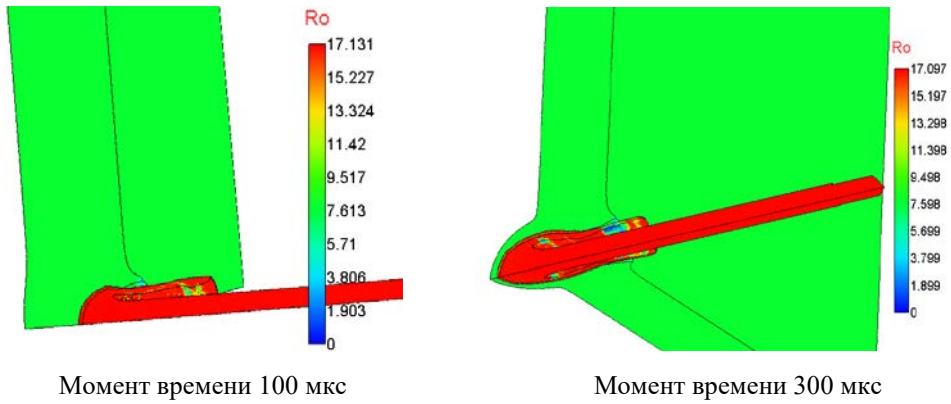
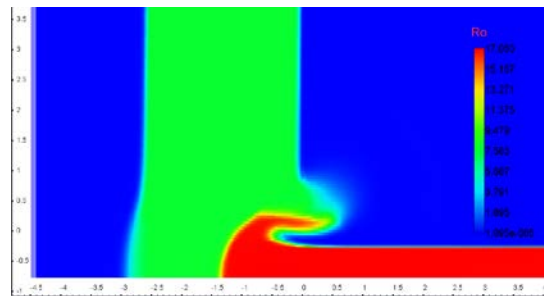


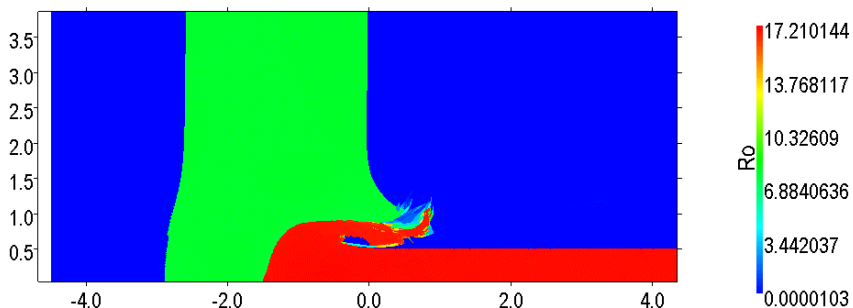
Рис. 3. Трехмерный расчет без смешанных ячеек

Расчет данной задачи характерен тем, что ударник, имея начальную скорость 0,6 км/с, пробивает преграду толщиной 2,5 см. Расчет трехмерной задачи сопровождался перестроением счетной сетки. Каждое перестроение связано с остановкой счета, построением новой сетки, переинтерполяцией величин. С внедрением возможности использования смешанных ячеек во время счета и автоматической переинтерполяцией величин с последующим выходом на счет было решено опробовать данный механизм и применить его для численного моделирования подобных задач. Оработка такого подхода производилась при расчетах как на двумерной, так и на трехмерной геометрии. Для этого было построено две начальные сетки (описанные выше). Результаты расчетов приведены ниже.

Двумерные расчеты проведены на сетке аналогичной трехмерной без смешанных ячеек. На рис. 4 – 6 приведено распределение поля давления (ГПа) и поля плотности ( $\text{г/см}^3$ ) в расчетах.

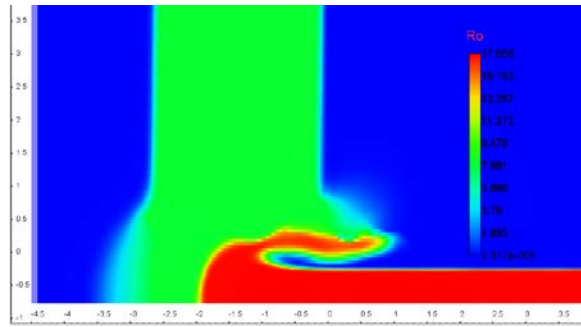


3D-расчет со смешанными ячейками

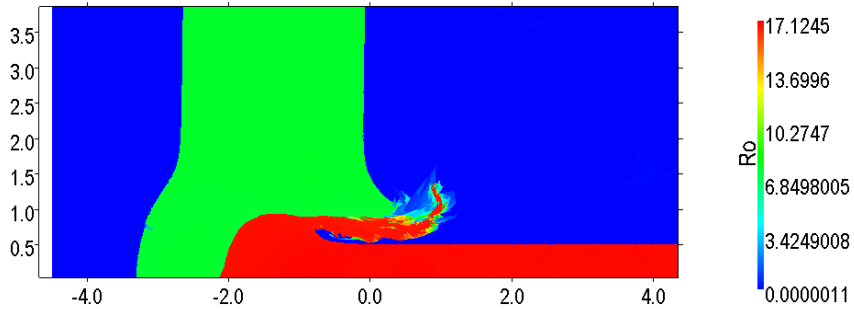


2D-расчет без смешанных ячеек

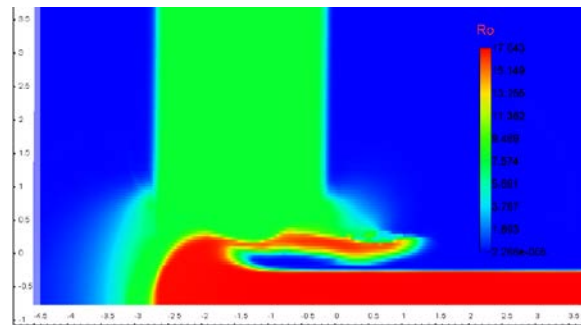
Рис. 4. Распределение поля плотности на момент времени 100 мкс,  $\text{г/см}^3$



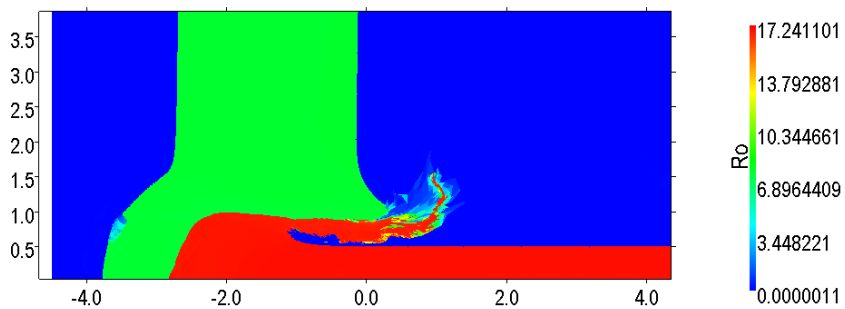
3D-расчет со смешанными ячейками



2D-расчет без смешанных ячеек

Рис. 5. Распределение поля плотности на момент времени 150 мкс, г/см<sup>3</sup>

3D-расчет со смешанными ячейками



2D-расчет без смешанных ячеек

Рис. 6. Распределение поля плотности на момент времени 200 мкс, г/см<sup>3</sup>

Сравнение результатов двумерного и трехмерного расчетов приведено на рис. 7. На данном рисунке граница веществ двумерного расчета нанесена на распределение плотности в трехмерном расчете.

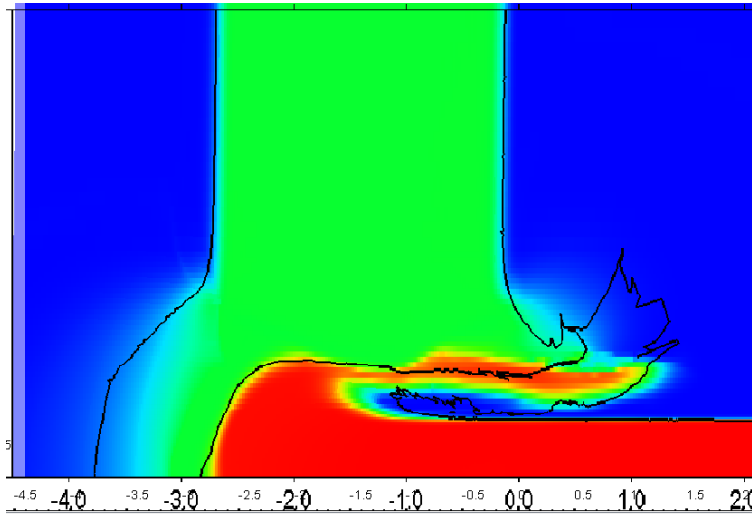


Рис. 7. Сравнение двумерного и трехмерного расчета. Распределение поля плотности на момент времени 200 мкс,  $\text{г/см}^3$

Далее приведем график проникновения ударника в преграду от времени.

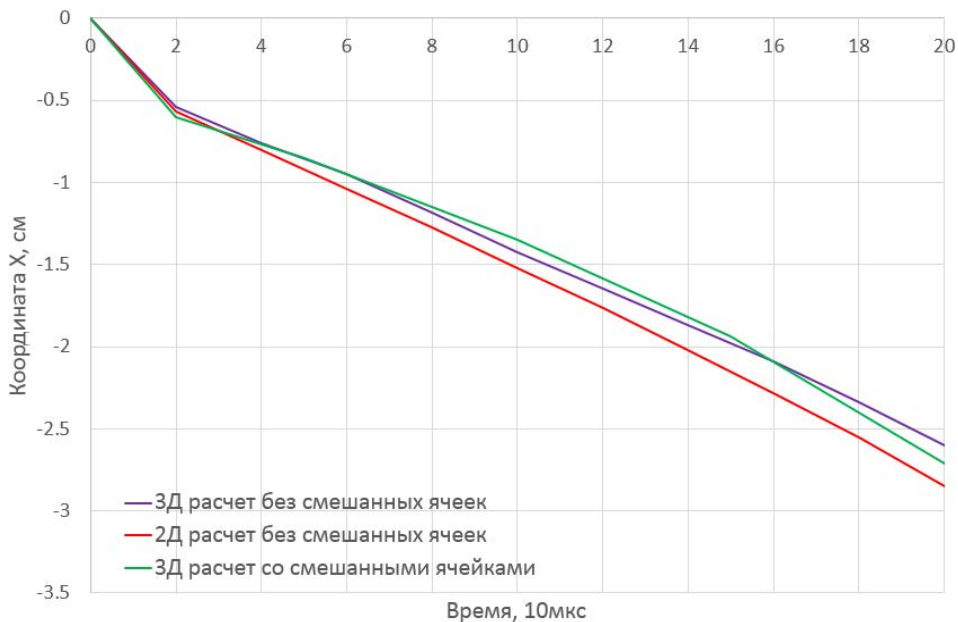


Рис. 8. График координаты X носика ударника от времени

На момент времени 200 мкс отличия в глубине проникания ударника в преграду между трехмерными расчетами составило 4,5 %. Отличие на тот же момент времени трехмерного расчета со смешанными ячейками и аналогичного по сетке двумерного расчета составило 5 %. Трехмерный расчет *без смешанных ячеек* проведен с ручным вмешательством пользователя, на некоторые моменты времени была перестроена вся сетка в ударнике либо в преграде. Трехмерный расчет *со смешанными ячейками* проведен полностью в автоматическом режиме. Перестроение сетки происходило через определенные моменты времени, исходя из критериев локальной перестройки сетки. Двумерный расчет проведен так же в автоматическом режиме без смешанных ячеек с применением поддержания качества счетной сетки.

На рис. 9 приведен фрагмент трехмерной задачи вблизи проникания ударника в преграду.

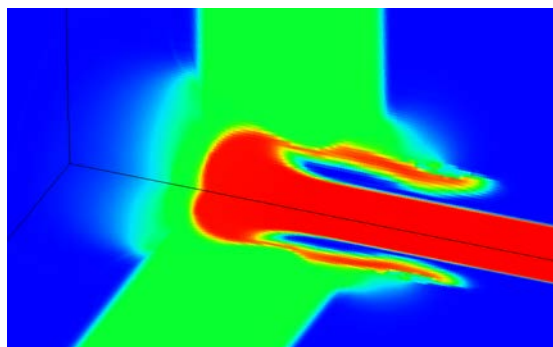
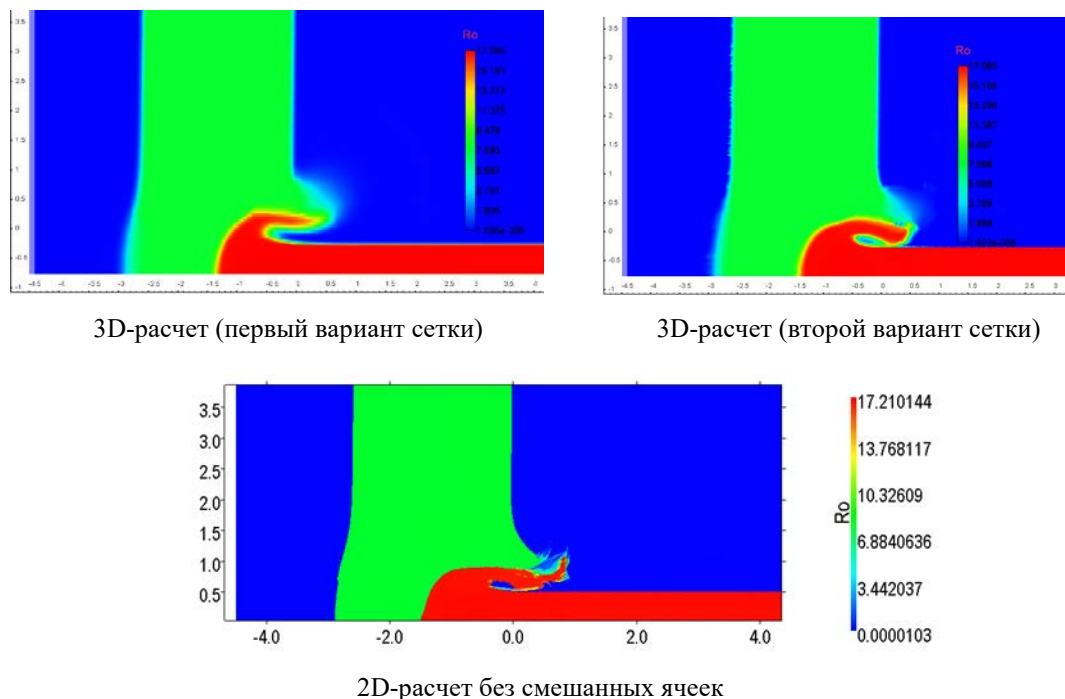


Рис. 9. Распределение поля плотности в трехмерном расчете на момент времени 200 мкс,  $\text{г/см}^3$

Расчет трехмерной задачи с применением переинтерполяции всей счетной области проведен полностью в автоматическом режиме без вмешательства пользователя.

Результаты расчета второго варианта геометрии, в котором более детально прописана преграда в области проникания ударника приведен на рис. 10.



3D-расчет (первый вариант сетки)

3D-расчет (второй вариант сетки)

2D-расчет без смешанных ячеек

Рис. 10. Распределение поля плотности на момент времени 100 мкс,  $\text{г/см}^3$

Отличие глубины проникания в трехмерных расчетах составило 3,5 %. И в двумерных, и в трехмерных расчетах получено полное пробитие преграды.

Далее рассмотрим результаты численного моделирования трехмерной постановки задачи, когда ударник подлетает под углом к преграде. Проведены расчеты в однообластной постановке с учетом смешанных ячеек и расчеты в многообластной постановке с учетом контактного взаимодействия.

Начальная геометрия строилась в пакете программ ЛОГОС-ПреПост [5], исходя из особенностей геометрии с необходимыми зонами измельчения. На рис. 11 и 12 представлена начальная геометрия для многообластной постановки задачи и для однообластной, соответственно.

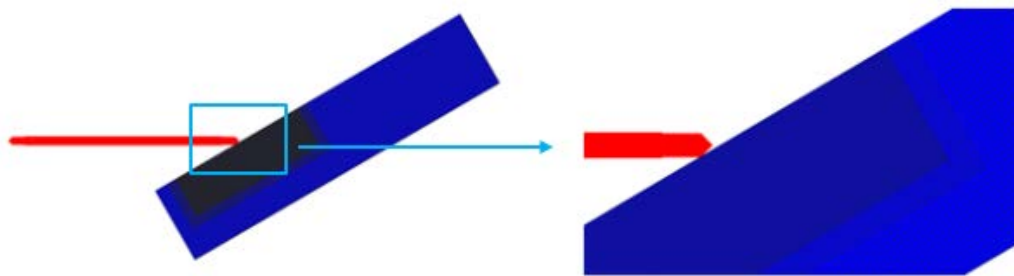


Рис. 11. Начальная геометрия для многообластной постановки задачи

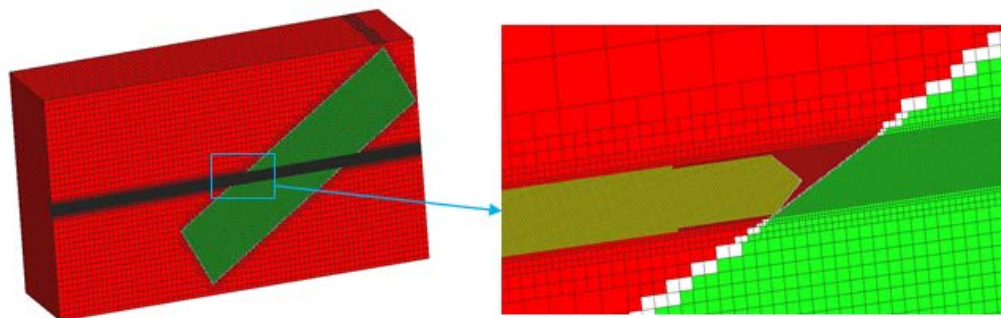


Рис. 12. Начальная геометрия для однообластной постановки задачи

В процессе счета для расчетов с использованием смешанных ячеек при сильной деформации сетки, когда ее качество не удовлетворяет определенным критериям методики локальной перестройки сетки выполняется переинтерполяция величин всей счетной области на новую сетку без остановки счета.

Для расчета на пробитие преграды с углом атаки ударника  $0^\circ$  угла подхода  $60^\circ$ , толщиной преграды 9 см и скоростью ударника 1,3 км/с график зависимости глубины проникания носика ударника от времени для трехмерных расчетов (со смешанными ячейками и без) представлен на рис. 13. На момент времени 130 мкс распределение поля плотностей для расчетов со смешанными ячейками и без представлено на рис. 14 и 15, соответственно. Получено полное пробитие преграды при проведении расчетов и со смешанными ячейками и без.

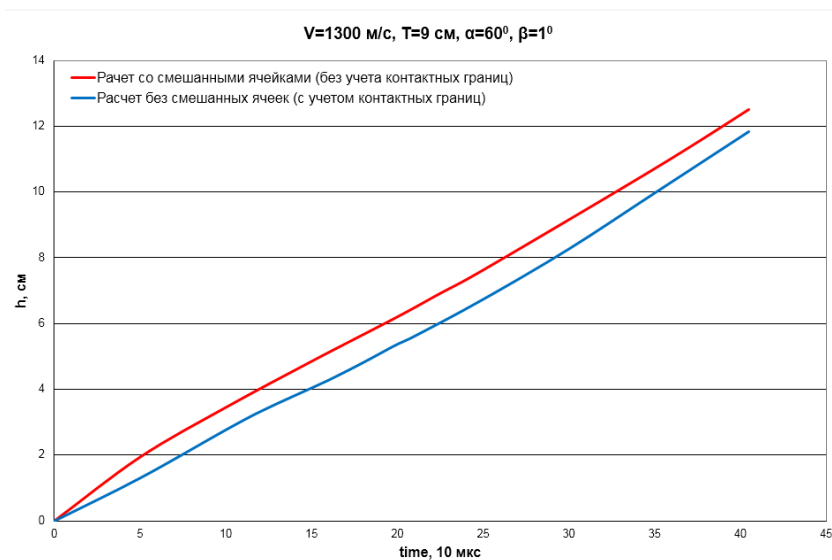


Рис. 13. График зависимости глубины проникания носика ударника от времени, см

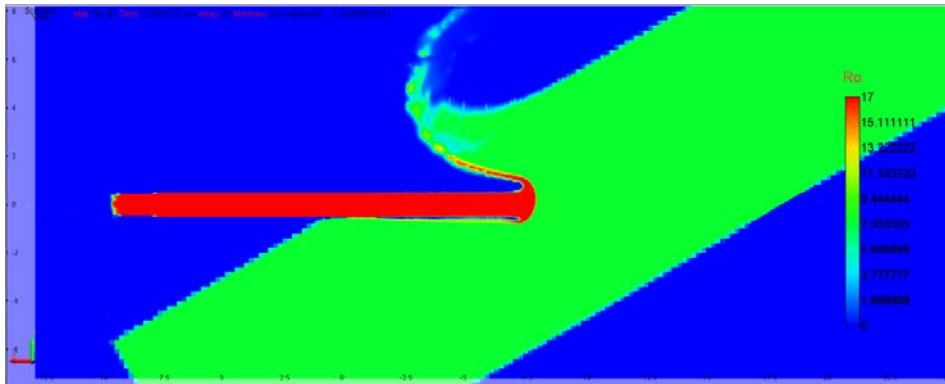


Рис. 14. Распределение поля плотностей для трехмерного расчета со смешанными ячейками на момент времени 130 мкс,  $\text{г/см}^3$

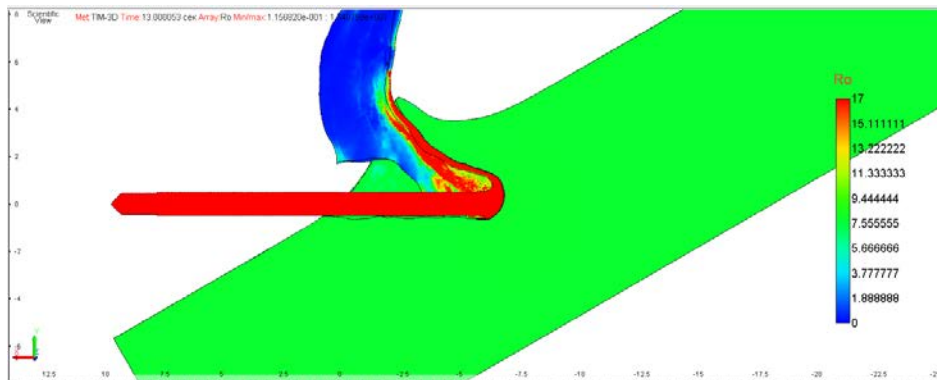


Рис. 15. Распределение поля плотностей для трехмерного расчета без смешанных ячеек на момент времени 130 мкс,  $\text{г/см}^3$

Для расчета с углом атаки ударника  $1^\circ$  угла подхода  $0^\circ$ , толщиной преграды 20 см и скоростью ударника 1,3 км/с график зависимости глубины проникания носика ударника от времени для трехмерных расчетов (со смешанными ячейками и без) представлено на рис. 16. На момент времени 250 мкс распределения поля плотностей для расчетов со смешанными ячейками и без представлены на рис. 17 и 18, соответственно.

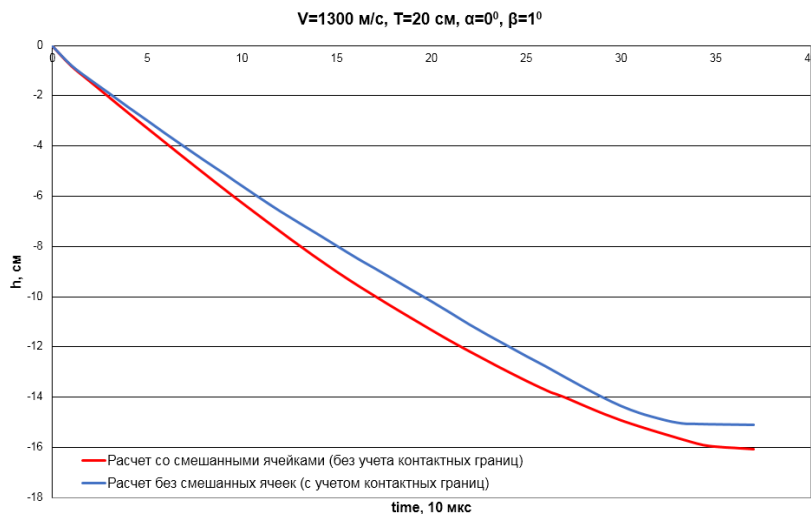


Рис. 16. График зависимости глубины проникания носика ударника от времени, см



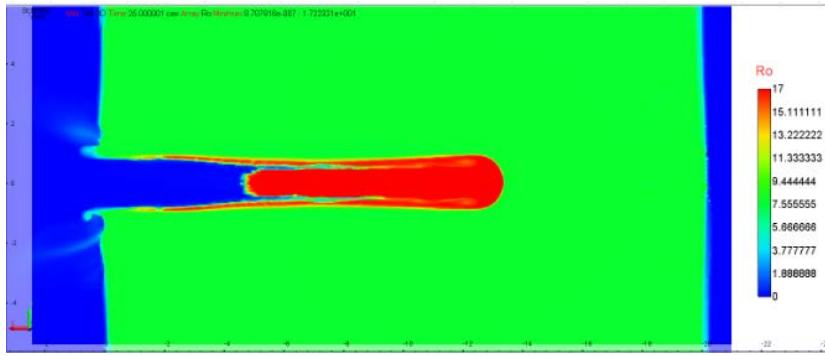


Рис. 17. Распределение поля плотностей для трехмерного расчета со смешанными ячейками на момент времени 250 мкс, г/см<sup>3</sup>

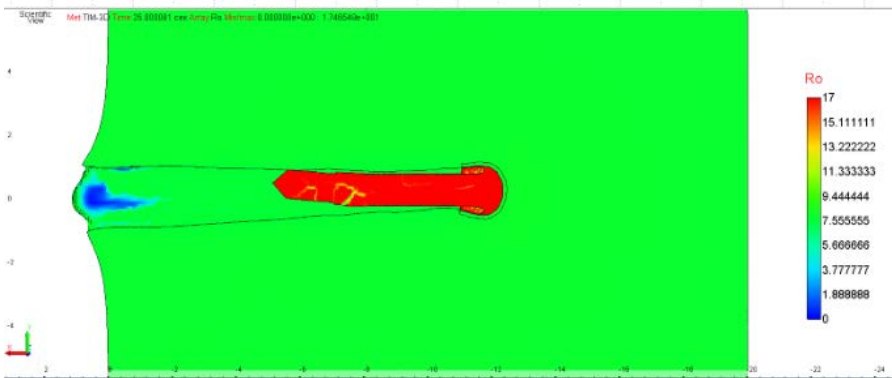


Рис. 18. Распределение поля плотностей для трехмерного расчета без смешанных ячеек на момент времени 250 мкс, г/см<sup>3</sup>

Разница в глубине бронепробития в расчетах, проведенных в многообластной и однообластной постановках, составила примерно 6 % за счет того, что расчеты в многообластной постановке проводились с учетом выделенных контактных границ между веществами, а в однообластной постановке без учета.

Сравнение глубин бронепробития в зависимости от скорости встречи ударника с преградой, полученные в расчетах, с экспериментальными данными [6, 7] представлены на рис. 19. На данном рисунке  $\lambda$  обозначает удлинение ударника (отношение длины ударника к его диаметру). Разница по глубине бронепробития в расчетах, проведенных со смешанными ячейками и без, составляет 6 %.

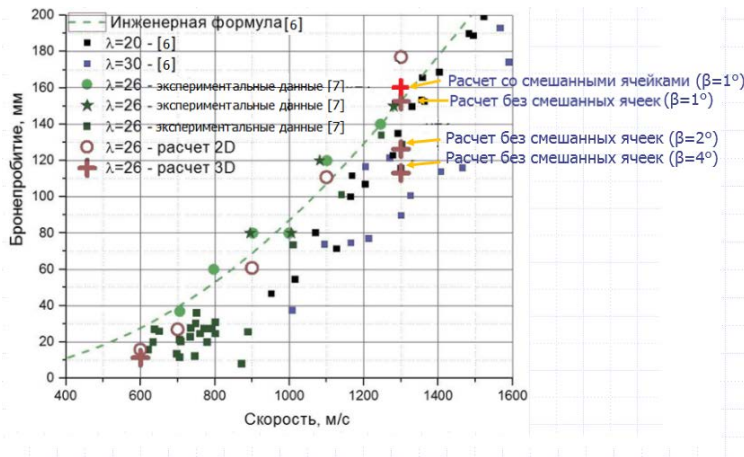


Рис. 19. График зависимости бронепробития от скорости ударника

## Выводы

Существует два подхода к проведению трехмерного численного моделирования.

Во-первых, расчет во многообластной постановке в лагранжевом приближении с учетом контактного взаимодействия между областями с учетом скольжения. Для поддержания приемлемой для счета сетки на протяжении всего расчета задачи применяется перестроение сетки в пакете программ ЛОГОС-ПреПост с сохранением характерных размеров ячеек в веществах с последующей переинтерполяцией величин со старой сетки на новую во время остановки расчета. В этом подходе имеется зависимость от качества построенной сетки и частоты перестроения, т. е. зависимость от «человеческого фактора».

Во-вторых, расчет с использованием смешанных ячеек, с частичным или полным отказом от лагранжевых контактных границ между веществами. Здесь возможно два варианта: расчет во многообластной постановке с использованием смешанных ячеек в отдельно взятой математической области (при сильных деформациях необходима остановка расчета для проведения перестроения сетки с последующей переинтерполяцией величин в отдельно взятой области) и расчет в однообластной постановке с использованием смешанных ячеек с применением автоматической корректировки сетки в локальных областях и с применением пересчета величин с деформированной сетки на новую без остановки счета (либо на стационарную сетку, либо на динамически адаптированную под решение сетку). В этом случае появление смешанных ячеек возможно только на границах раздела веществ после локальной корректировки или полного перестроения всей сетки. Между этапами пересчета величин расчет проводится в лагранжевом приближении без допущения перетекания веществ между ячейками.

Подход к расчету задач с использованием смешанных ячеек позволяет исключить влияние «человеческого фактора» на результаты и значительно сократить сроки проведения расчетов без существенного отличия в получаемых результатах от экспериментальных данных и результатов расчета без смешанных ячеек с учетом контактного взаимодействия между различными материалами.

В проведенных двумерных и трехмерных расчетах наблюдается хорошее качественное согласие. Отличие глубины проникания ударника составило 3–6 % в зависимости от применяемого подхода счета. Полученные результаты коррелируют с двумерными расчетами и известными экспериментальными данными.

С помощью методики ТИМ и разработанного подхода с использованием смешанных ячеек для проведения такого класса расчетов можно довольно просто и быстро получить оценки по бронепробитию преград при вариации скорости, материала преграды, толщины преграды, угла подхода и угла атаки, формы ударника и тем самым минимизировать затраты на дорогостоящие эксперименты.

## Литература

1. 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.
2. 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.
3. Панов А. И., Шурыгин А. В. Некоторые алгоритмы построения неструктурированных многоугольных сеток для методики ТИМ-2D // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2015. Вып. 1. С. 56–65.
4. Панов А. И., Шурыгин А. В. Использование различных преобразований счетной сетки в методике ТИМ-2D // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2015. Вып. 2. С. 78–87.

5. Фархутдинов В. Ф., Тарасов В. И., Соловьев А. Н., Борисенко О. Н., Лазарев В. В., Логинов Д. В., Аверина Н. С., Марунин А. В., Гриднев А. И., Федякина М. Г., Кузнецов М. Г., Черенкова М. В., Фролова Е. А., Лукичев А. Н., Смолкина Д. Н., Купалова А. Г., Кузьменко М. В., Ховрин Н. А., Сергеева А. С., Попова Н. В., Баканова Т. Ю. Обзор возможностей по обработке геометрических и построению сеточных моделей в ЛОГОС-Препост // Труды XIV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. С. 585–592.

6. Charles E. Anderson, Jr. Bruce L. Morris, David L. Littlefield. A Penetration Mechanics Database. SwRI Report 3593/CO1 (отчет для агентства DARPA, США), 1992.

7. Половникова Т. Н., Свидинский А. В., Соколов С. С., Новиков И. Г., Самодолов А. В. и др. «Трёхмерное численное моделирование броневой защиты удлинённого ударника в методике ТИМ-3D» // Доклад на 47-я НТК "Проектирование систем", 4–6 февраля 2020 г, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва.

## **THE TIM CODE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF IMPACTOR'S ARMOUR-PIERCING EFFECT ON A BARRIER**

*A. V. Svidinskiy, S. S. Sokolov, I. G. Novikov, A. V. Samodolov, T. N. Polovnikova*

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

The paper presents results of the numerical simulation of the armour-piercing effect of an impactor on a barrier obtained by the TIM code. Results of 3D calculations with the use of mixed cells and without them are compared with results of 2D calculations without mixed cells and available data of experiments.

*Key words:* three-dimensional and two-dimensional calculations, numerical simulation, the TIM code, an impactor, a barrier, mixed cells.