

УДК: 623.4.01

DOI: 10.53816/20753608_2022_3_66

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМИНИРОВАНИЯ
ПУТЕМ ВЫБРОСА МИН ИЗ ПРОХОДА ЗА СЧЕТ ВЗРЫВА**
**SIMULATION OF MINE CLEARING PROCESS BY MEANS OF MINE'S LAUNCH
FROM LANE AS A RESULT OF BLAST**

По представлению чл.-корр. РАРАН И.М. Смирнова

И.В. Спирин, С.С. Рассоха, М.Г. Саутина

АО «НИИИ»

I.V. Spirin, S.S. Rassoha, M.G. Sautina

Предлагается комбинированная методика моделирования движения противотанковых мин по грунту под действием ударно-волновой нагрузки, сил инерции и трения, в процессе проделывания прохода в минно-взрывном заграждении с применением средств взрывного разминирования. Приводятся особенности осуществления постановок согласованных по исходным данным, результатам и времени моделирования подзадач в специализированных программах различного назначения и примеры их решений. Экспертно оценивается применимость методики в работах по созданию перспективных отечественных средств и систем взрывного разминирования. Выводами констатируются возможности повышения качества обоснования конструкторских решений.

Ключевые слова: моделирование, инженерный боеприпас, система взрывного разминирования, метание, инженерный анализ, имитационная модель, траектория.

In this article is proposed combined simulation procedure of mine's movement on the ground under the action of shock-wave load, as well as frictional force in the process of obstacle breaching using explosive mine clearance equipment. Here are suggested features of the formulation of coordinated subtasks in specialized programs for various purposes and examples of their solutions. The expert assesses the applicability of the methodology in the work on the creation of advanced indigenous means and mine clearance systems. The conclusions report the possibilities of improving the quality's substantiation of design solutions.

Keywords: simulation. engineering ammunition, explosive mine clearance system, launching, engineering review, simulated model, trajectory.

Разминирование взрывным способом является одним из наиболее распространенных способов обезвреживания инженерных боеприпасов как в России, так и за рубежом [1, 2]. В частности, данный способ широко распространен при создании безопасных проходов в противотанковых и смешанных минных полях. В настоящее время отсутствуют признаки перехода на об-

разцы, функционирующие на иных физических принципах формирования безопасных проходов.

Требуемый результат — проход заданной ширины и длины, в котором отсутствуют функционирующие мины, обеспечивается за счет связанной совокупности процессов различной природы, основным из которых является выброс мин взрывом.

Уровень развития технологий численного моделирования на современном этапе позволяет воспроизводить практически всю связанную совокупность процессов, приводящих к обезвреживанию мины: детонация заряда взрывчатого вещества; взаимодействие мины с ударной волной в воздухе и на земле; движение мины по инерции. Различаясь по степени отработанности и детализации, перечисленные процессы в совокупности соответствуют выбросу мины взрывом в ходе разминирования.

Изложенное в достаточной степени подтверждает актуальность материала статьи, который ориентирован не на прикладные результаты, а на раскрытие ограничений и особенностей реализации технологий моделирования с помощью доступного программного обеспечения специального назначения.

На основании имеющегося опыта постановку и решение усложненной численной задачи, описывающей все перечисленные подпроцессы выброса мины взрывом в одной программной среде, авторы считают избыточно ресурсоемкой и нецелесообразной. Наиболее предпочтительно использование комплекта программ, обеспечивающих решение задачи моделирования за минимальное время и с использованием минимальных вычислительных ресурсов.

В ходе написания статьи использовались следующие программы:

- модуль Autodyn CAE-системы ANSYS для моделирования детонации заряда разминирования, распространения продуктов взрыва и параметров ударной волны во времени и пространстве [3];
- САПР FreeCAD 0.19 для разработки геометрических моделей (исходных данных в вычислительных экспериментах) [4];

- модуль инженерного анализа из состава программно-методического комплекса «Двойник-ПС» (на базе комплекса «Логос 5.3.19») для расчетного определения коэффициентов аэродинамических сил и моментов [5];

- комплекс Euler 10.43 Demo (x64) — для моделирования взаимодействия мины, ударной волны и грунта, а также вычисления параметров траектории [6].

На первом этапе реализации комплексной методики с использованием модуля ANSYS Autodyn численно моделировался в двухмерной и трехмерной постановках взрыв удлиненного заряда. Основное внимание сосредотачивалось на оценке величин скорости, давления и удельного импульса при прохождении воздушной ударной волны на различных расстояниях от продольной оси заряда.

На рис. 1 приведены геометрические модели для двухмерной и трехмерной задач, в которых заряды одного и того же взрывчатого вещества (ВВ) обладали одинаковыми размерами в плоскости, перпендикулярной оси симметрии. При этом в 2D случае заряд ВВ предполагался сплошным в осевом направлении, а в 3D варианте — разнесенным, состоящим из трех цилиндрических шашек с воздушным промежутком между ними (рис. 1).

На рис. 1 надписями и выносками обозначены воздух, заряды ВВ и грунт (песок). Цифрами обозначены положения эйлеровых датчиков. В расчете использовались датчики, которые располагались вдоль песчаной поверхности на расстояниях 2, 3,5 и 7 м соответственно. Инициирование детонации проводилось с оси симметрии заряда ВВ в 2D постановке или с геометрических центров торцевых поверхностей в 3D случае.



Рис. 1. Геометрические модели 2D и 3D задач

При численном моделировании в 2D случае предполагалось следующее:

- расчетная плоскость перпендикулярна оси симметрии заряда;
- во всех подобных плоскостях процесс развивается одинаково, то есть детонация удлиненного заряда происходит одновременно по всей длине на оси симметрии.

Расчетная область в 2D постановке представлена прямоугольником с размерами $10 \times 3,5$ м. Верхняя и правая границы на левой половине рис. 1 представляли собой границы со свободным вытеканием материалов, нижняя и левая — абсолютно жесткие стенки.

В 3D случае использовалась следующая модель задачи:

- три сосредоточенных заряда в форме параллелепипеда инициировались последовательно с задержкой 0,288 мс по своему правому торцу слева направо согласно правой половине рис. 1;
- размеры каждого заряда: длина 300 мм, в сечении — квадрат со стороной 125 мм, расстояние между центрами масс зарядов — 2 м;
- расчетная область представляла собой параллелепипед с размерами $4,9 \times 7,01 \times 1,5$ м;

– граничные условия на всех поверхностях расчетной области, кроме нижней, соответствовали условию свободного вытекания, а нижняя представлена «жесткой стенкой» в роли плоскости симметрии.

В расчетной 3D области устанавливались группы эйлеровых датчиков. Расстояния от датчиков до оси, на которой располагались заряды — 2, 3, 5, 7 м. Группа датчиков 1–3 находилась на луче, выходящем из центра масс самого левого на рис. 1 заряда, который инициируется первым. Группа датчиков 4–6 находилась на луче, расположенном посередине между правым зарядом и центральными зарядами, рис. 2, 3. Группа датчиков 7–9 располагалась посередине между центральным и правым зарядами, рис. 3.

Для всех постановок (2D и 3D) в качестве моделей воздуха и песка использовались материалы Air и Sand, заимствованные из библиотеки Autodyn. В качестве взрывчатого вещества использовалась модель среды, описываемой уравнением состояния JWL со значениями параметров, выбранных согласно статье [7]. Параметры уравнения состояния: плотность $\rho = 1966$ кг/м³, $A = 2,122E+11$ Па, $B = 7,0E+9$ Па, $R1 = 4,4$, $R2 = 1,2$, $\omega = 0,38$, скорость детонации

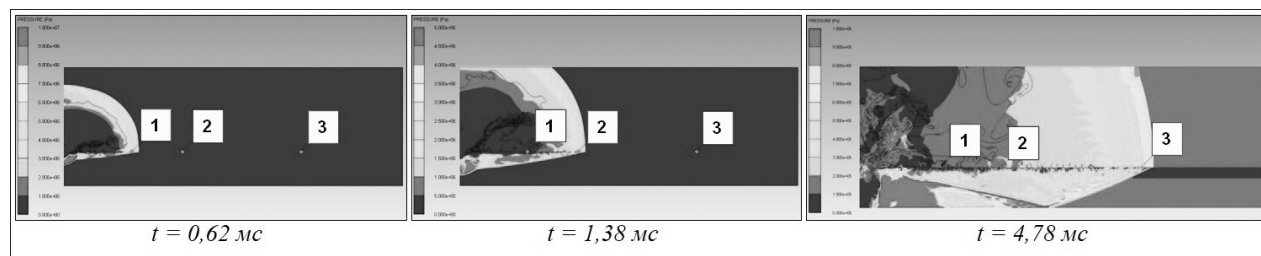


Рис. 2. Кинограмма распределений давления

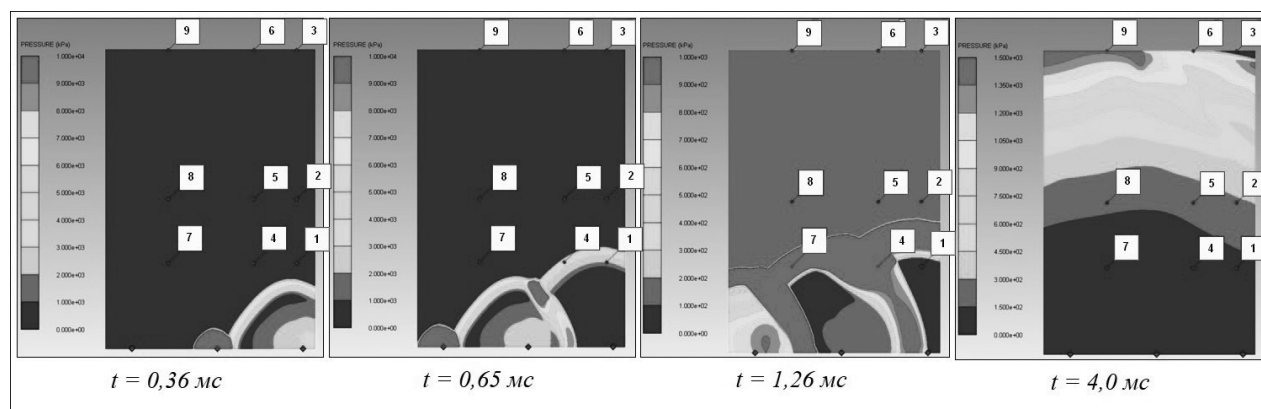


Рис. 3. Кинограмма распределения давления на границе песка и воздуха

$D = 7600$ м/с, удельный тепловой эффект химической реакции $Q = 1,25E+10$ Дж/м³, давление на фронте детонационной волны $P_H = 2,236E+10$ Па.

На рис. 2 приведены распределения давления для 2D постановки в различные моменты времени.

На рис. 2 показан порядок распространения воздушной ударной волны и порождаемой ею ударной волны в песке. На пятой микросекунде видна отраженная от нижней границы расчетной области (условие «жесткая стенка») ударная волна в песке.

Распределения давления на границе между песком и воздухом для 3D постановки приведены на рис. 3.

На рис. 3 отчетливо наблюдается эффект усиления воздушной ударной волны при детонации последующего заряда по сравнению с предыдущим. Наибольшее различие в величине давления на фронте ударной волны наблюдается в волнах, которые порождены зарядами, инициируемыми первым и вторым, — в 1,8 раза. Давление на фронте ударной волны от третьего заряда больше давления на фронте ударной волны от второго заряда приблизительно в 1,3 раза. Ожидается, что относительное усиление давления на фронте ударной волны от каждого последующего заряда будет снижаться.

Примеры распределения параметров, зарегистрированных датчиками в различные моменты времени, представлены на рис. 4.

Анализируя данные рис. 4 можно сделать вывод, что с увеличением расстояния до оси симметрии заряда в 2D модели максимальное

давление и скорость снижаются, а значение удельного импульса ведет себя немонотонно: возрастает до некоторого расстояния, а затем — начинает снижаться. Причиной такого немонотонного поведения удельного импульса в зависимости от расстояния является разнонаправленный характер изменения физических величин, его определяющих, — давление на фронте ударной волны уменьшается с расстоянием, а длительность положительной фазы сжатия возрастает.

Для 3D постановки из результатов расчетов следует вывод о том, что ближайшие к оси зарядов ВВ датчики (№ 1, 4, 7), находящиеся на расстоянии 2 м, регистрируют наибольшее давление на фронте ударной волны в случае их расположения на радиальной оси, выходящей из центра масс самого правого заряда или между правым и центральным зарядом. Для крайнего правого заряда на рис. 1 максимальное давление регистрируется не ближайшим к нему датчиком № 7 (расстояние 2 м), а датчиком № 8 (расстояние 3 м). Этот результат объясняется влиянием воздушных ударных волн, возникающих при детонации соседних зарядов, которые сдерживают движение воздуха в осевом направлении, тем самым перераспределяя энергию в радиальном направлении.

Среди датчиков, расположенных на максимальном расстоянии от оси зарядов на рис. 1 (№ 3, 6, 9) (расстояние — 7 м), наибольшее давление регистрируется на датчике № 9, находящемся ближе к правому краю расчетной области. При этом значение максимального давления на

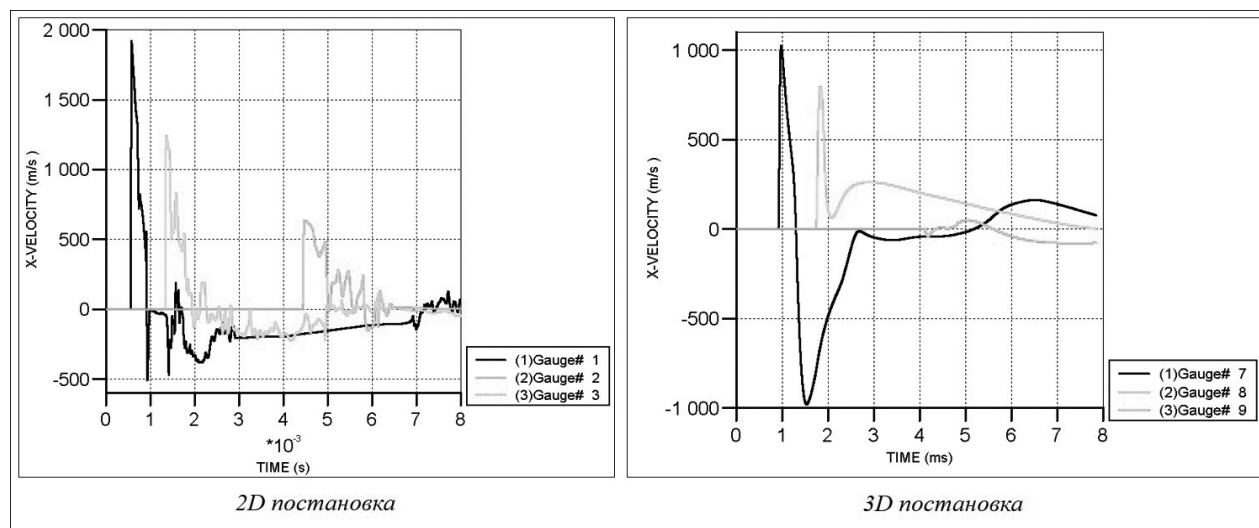


Рис. 4. Зависимости скорости на датчиках от времени

датчике № 9 незначительно отличается от датчиков № 3 и 6. Также представляет интерес сравнение картины распределения давления по группам датчиков № 4–6 и 7–9, расположенных на радиальных лучах, выходящих посередине двух зарядов, соответственно, левого и центрального, центрального и правого на рис 1. В ближней зоне (2 м) значительной разницы давлений не наблюдается. По-видимому, ограничивающее влияние соседних зарядов не успевае сказаться на распространении ударной волны. В то же время на среднем (3,5 м) и большом удалении (7 м) влияние соседних зарядов начинает ощущаться и проявляется в увеличении давления на фронте ударной волны (датчики № 8 и 9 по сравнению с датчиками 5 и 6) приблизительно в 1,3 раза.

Сравнение результатов в двухмерной и трехмерной постановках показывает, что по максимальному избыточному давлению на фронте ударной волны двухмерный и трехмерный расчеты расходятся в ближней к зарядам области (давление больше для двухмерного расчета) и практически совпадают на расстояниях, превышающих 3 м.

На следующем (втором) этапе реализации методики, на основании распределения параметров ударной волны во времени и пространстве рассчитывались коэффициенты аэродинамических сил и моментов в комплексе «Логос».

Геометрические модели мин, созданные во FreeCAD, представлены на рис. 5, [7–9].

Анализ рис. 5 показывает значимое разнообразие формы и потребного уровня детализации внешней поверхности инженерных боеприпасов.

В качестве особенностей подготовки геометрических моделей авторы отмечают:

- из-за схожести функционального действия на объекты поражения подавляющее большинство инженерных боеприпасов представляют собой тела вращения малого ($\ll 1$) удлинения;

- мин, внешняя поверхность которых включает построение плоскости симметрии, не выявлено;

- целесообразно проводить решение задачи об обтекании мины ударной волной в «половинной» постановке с учетом наличия плоскости симметрии для уменьшения размеров дискретной (сеточной модели) и сокращения времени вычислений;

- элементы, усложняющие внешнюю поверхность мин (ребра жесткости для повышения прочности, рукоятки и петли для ручной переноски, выступы и выемки для соединения с взрывательными устройствами и другими боеприпасами, устройства ориентации и т.д.) имеют размеры, исключающие упрощение геометрической модели за счет их удаления.

Для подтверждения заключительного тезиса перечня проведен сравнительный расчет на примере мины SB-81 в вариантах с наличием и отсутствием ребер жесткости, результаты которого приведены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что изменение коэффициента лобового сопротивления C_x на 5,1 % исключает возможность упрощения геометрической модели путем удаления ребер жесткости.

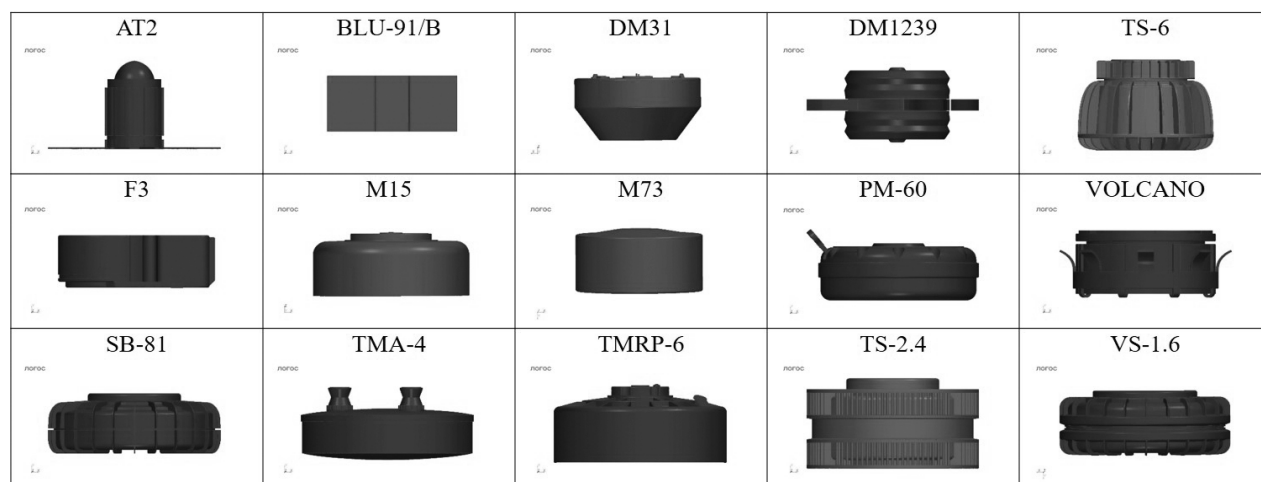


Рис. 5. Геометрия исследуемых боеприпасов

Результаты расчетов по вариантам

Параметр	SB-81 с ребрами жесткости	SB-81 без ребер жесткости
Графики невязок в процессе расчета		
Распределение давления		
Распределение скорости		
Максимальное давление, МПа	3,36	5,76
Максимальная скорость, км/с	0,86	1,07
Коэффициент лобового сопротивления	1,16	1,21

Технология расчетного получения коэффициентов аэродинамических сил и моментов в диапазоне скоростей до сверхзвуковых включительно считается традиционной, достаточно развитой и верифицированной.

В модуле инженерного анализа ПМК «Двойник-ПС», созданного на основе ПК «Логос» реализован стандартный для САЕ-систем алгоритм решения задачи, включающий последовательное создание геометрической, дискретной (сеточной), физико-математической модели вычисления и аналитическую обработку результатов.

Примеры дискретных моделей, подготовленных генератором отсечения ячеек, приведены на рис. 6.

Анализ рис. 6 показывает достаточно высокую детализацию дискретных моделей и позво-

ляет косвенно оценить качество построенной сетки.

При создании физико-математической модели воздействия ударной волны на мину параметры этой волны, образующейся после взрыва, задаются в виде постоянных или изменяющихся во времени скорости и давления потока на входе области продувки.

Общими для всех инженерных боеприпасов особенностями вычисления коэффициентов аэродинамических сил и моментов являются:

- повышенные требования к точности размещения мины на опорной поверхности;
- необходимость выбора плоскости симметрии таким образом, чтобы рассекаемые грани поверхности мины стремились к нормали сечения,

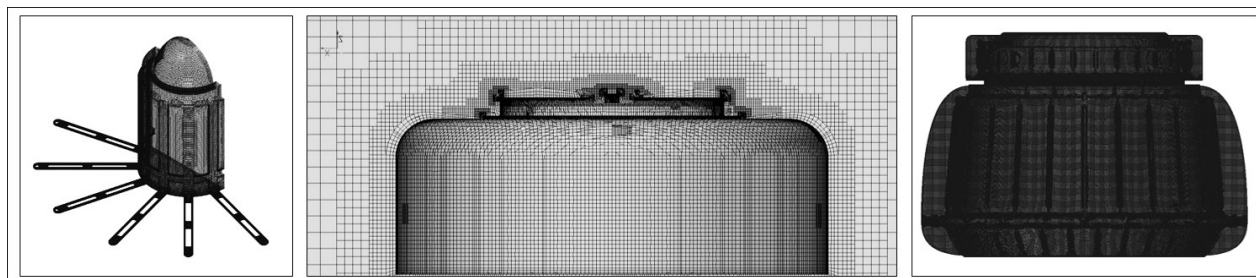


Рис. 6. Дискретные модели

особенно для геометрических элементов с малыми радиусами кривизны;

- использование только сверхзвукового (учитывающего сжимаемость) решателя (TVD ПК «Логос») даже при малых (менее 0,4) числах Маха;

- учет турбулентности потока моделью $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport), которая обеспечивает приемлемую сходимость с экспериментами при расчете свободных и струйных сдвиговых течений, а также пристеночных пограничных слоев;

- обеспечение приемлемой для вычислительных экспериментов точности модели пограничного слоя вокруг поверхности мины за счет количества призматических слоев дискретной модели от 3 до 10 с относительной толщиной от 0,001 до 0,007 и безразмерным расстоянием до стенки Y^+ от 1 до 50.

В процессе построения геометрических, дискретных и физических моделей проводились необходимые проверки (замкнутость геометрии, пересечения граней, открытые контуры, нумерация ячеек, наличие ячеек с отрицательным объемом и др.), предусмотренные методикой [10].

Вычислительные эксперименты проводились в режиме серийных или распараллеленных расчетов в течение 3 с модельного времени с шагом 0,001 с (до 5 000 итераций).

Приемлемая сходимость полученных решений подтверждается графиками невязок, приведенных на рис. 7.

Анализ рис. 7 показывает, что вычисления продолжались до тех пор, пока длительность

установившегося значения невязок не превышала продолжительность переходного процесса более чем в 3 раза.

Для аналитической обработки результатов использовались программы Scientific View и Логос-Монитор, входящие в состав дистрибутива ПМК «Двойник-ПС». С их помощью получены картины распределения параметров обтекающей среды по корпусу мины (рис. 8, 9) и графики сил, действующих на мину (рис. 10).

Рассмотрение рис. 8–10 показывает схожесть картин распределения параметров обтекающей среды, а также необходимость использования осредненных значений сил и моментов при вычислении аэродинамических коэффициентов.

Коэффициенты аэродинамических сил и моментов вычислялись на основании их средних значений по формуле и ей подобным по соответствующим осям системы координат:

$$C_x = 2,0 \cdot F_x / (\rho \cdot V^2 \cdot S),$$

где F_x — составляющая общей аэродинамической силы, действующая на мину по оси X , Н; V — скорость среды, для которой получена сила, м/с; ρ — плотность среды, кг/м³; S — площадь миделя мины, м².

В ходе дальнейших вычислений параметров траектории мины (третий этап методики) целесообразно использовать осредненные значения коэффициентов аэродинамических сил и моментов.

Исходными данными для траекторного моделирования в ПК «Эйлер» являются:

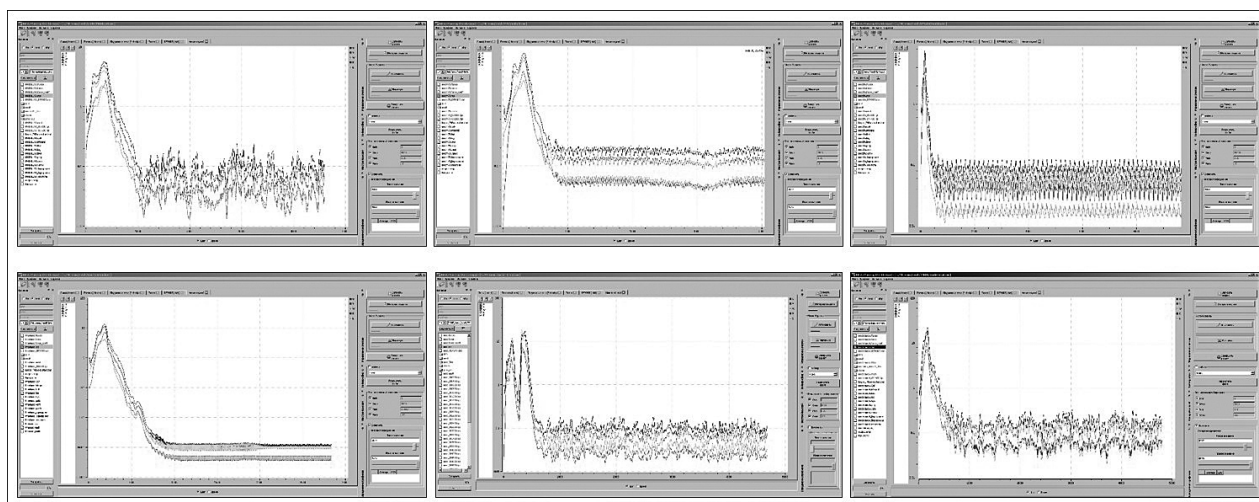


Рис. 7. Графики невязок в интерфейсе Логос-Монитор

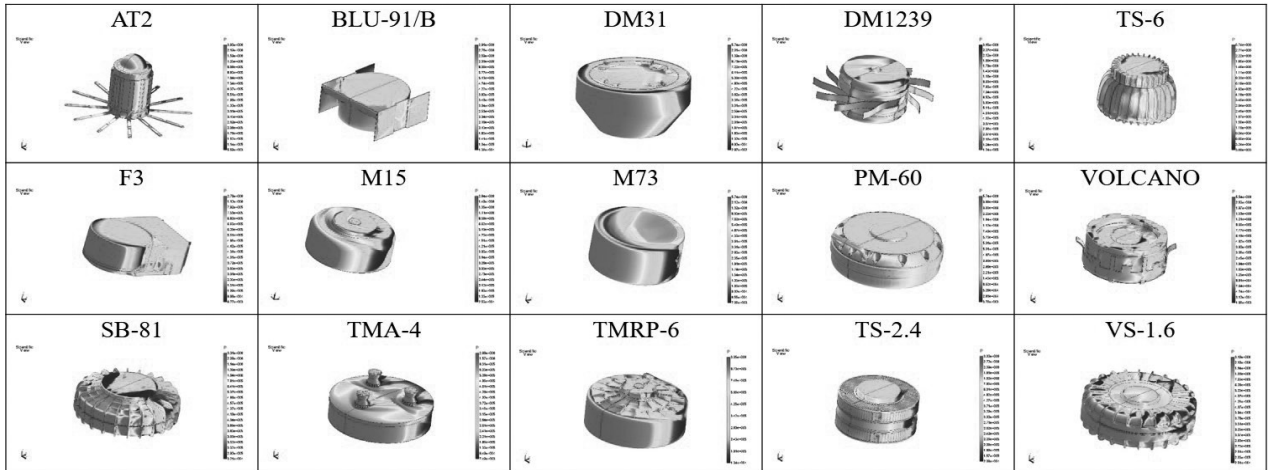


Рис. 8. Распределение давления по поверхности мин

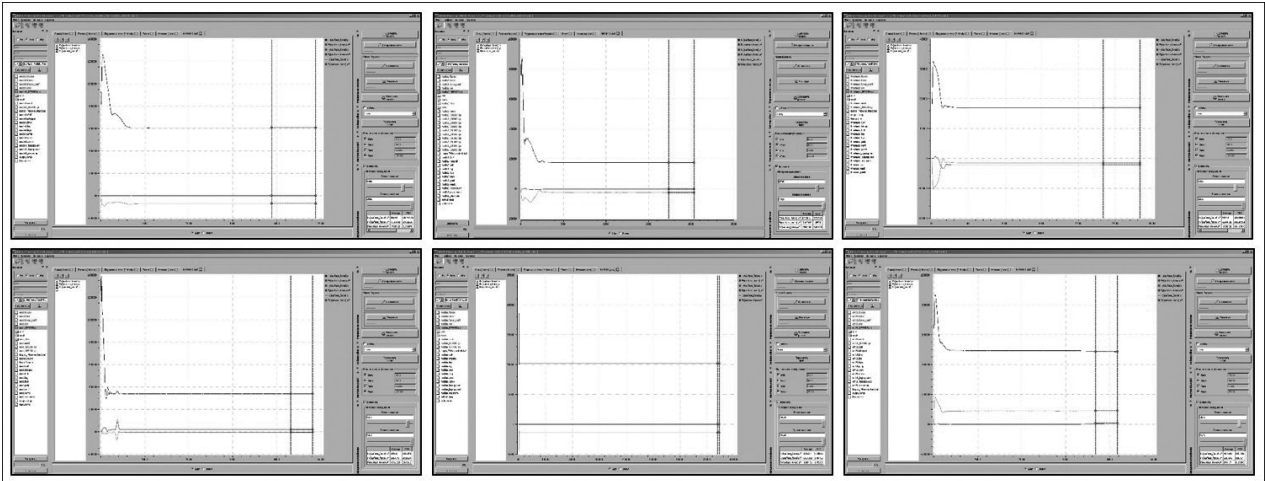


Рис. 9. Распределение скорости на внешней границе пограничного слоя

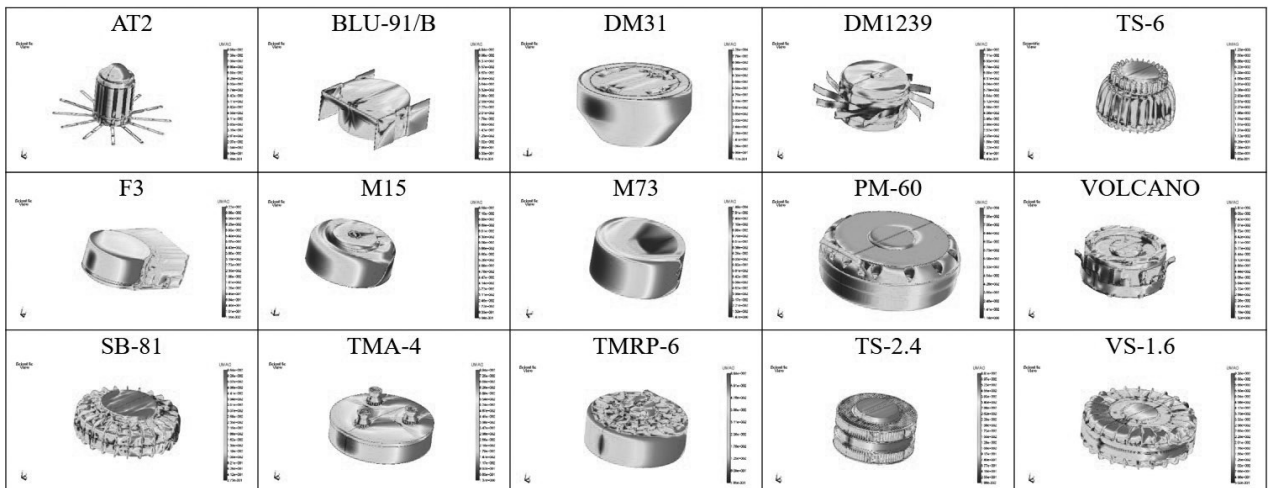


Рис. 10. Значения F_x по итерациям в Логос-Монитор

– геометрическая модель мины с массо-моментными характеристиками, задаваемыми тензором инерции (создается и рассчитывается в САПР на этапе построения геометрической модели);

– параметры ударной волны (скорость, давление) во времени (рассчитывается на первом этапе);

– коэффициенты аэродинамических сил и моментов (рассчитываются на втором этапе);

– другие необходимые параметры (коэффициент трения-скольжения мины по грунту, жесткость контактного взаимодействия, коэффициент восстановления скорости и др.).

Интерфейс программы Euler 10.43 Demo (x64) с открытой моделью мины на грунте приведен на рис. 11.

Модель, представленная на рис. 11, предполагает реализацию следующих допущений и ограничений:

– все элементы модели представлялись в качестве недеформируемого твердого тела;

– гравитационное воздействие осуществлялось в вертикальной плоскости;

– плотность среды (в отличие от скорости и давления) сохраняется постоянной;

– мина связана с грунтом шарниром без ограничений (6 степеней свободы);

– контактное взаимодействие всех элементов мины с грунтом описывалось одина-

ковыми закономерностями (точка–плоскость, точка–тело, и пр.);

– продолжительность моделирования 3 с, шаг модельного времени (интегрирования) — 0,001 с.

Кинограмма визуализации результатов моделирования траектории движения мины приведена на рис. 12.

Анализ рис. 12 показывает приемлемую качественную непротиворечивость результатов моделирования.

Примеры визуализации параметров траектории (координаты и скорость центра масс мины) приведены на рис. 13.

Сравнение рис. 12 и 13 дополнительно подтверждает непротиворечивость результатов и показывает соответствие экстремумов графиков моментам взаимодействия мины с ударной волной и грунтом.

Таким образом, доказательно и наглядно изложено содержание трехэтапной методики моделирования процесса разминирования путем выброса мин из прохода за счет взрыва с использованием доступного программного обеспечения, чем подтверждена практическая значимость статьи.

Авторы отмечают, что ограничений методики, накладываемых типами заряда разминирования, мины, грунта и других условий, в ходе разработки статьи не выявлено, а перечень исполь-

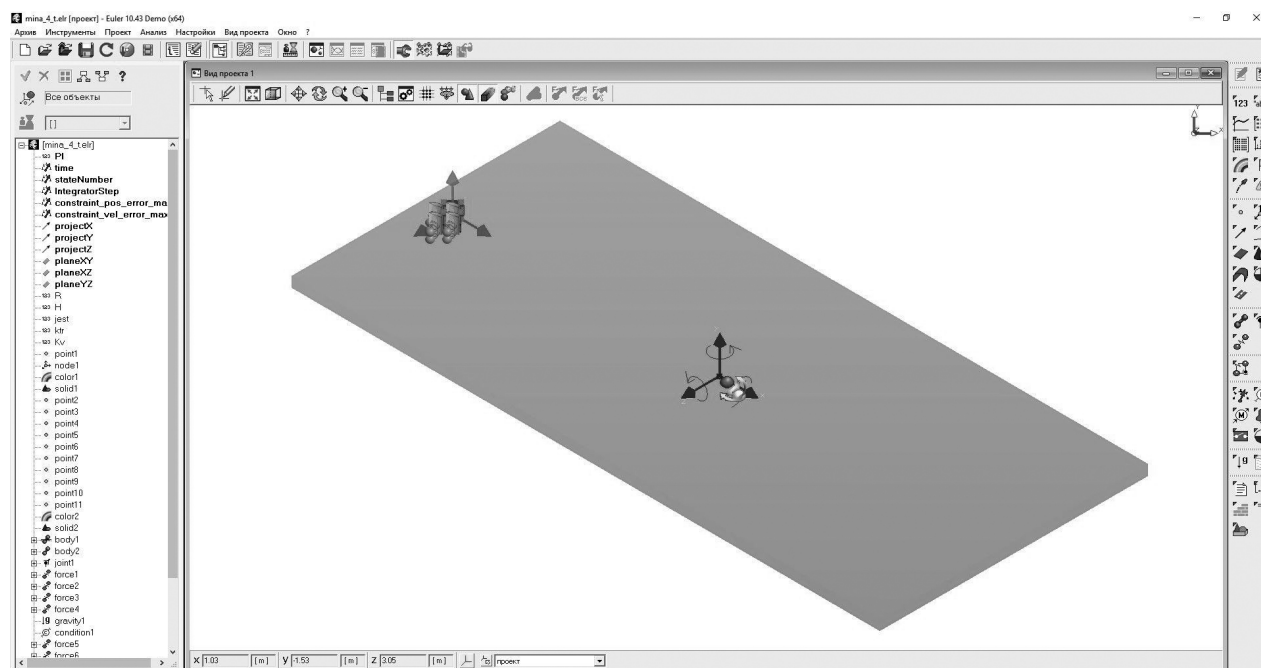


Рис. 11. Интерфейс программы «Эйлер»

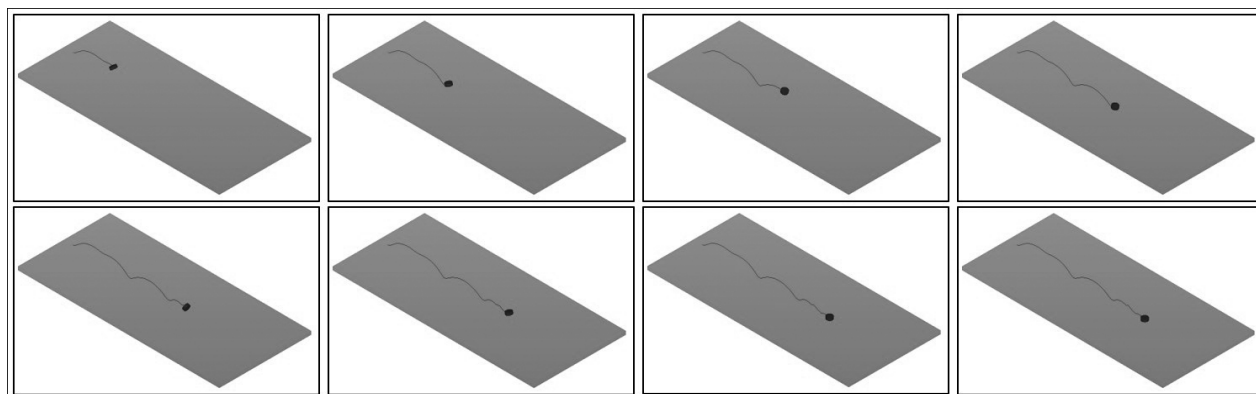


Рис. 12. Кинограмма результатов моделирования

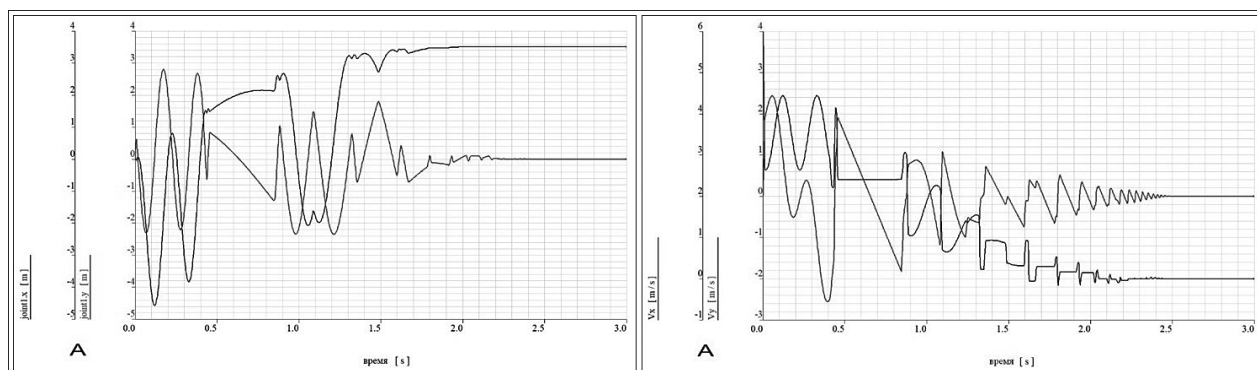


Рис. 13. Зависимости координат и скоростей центра масс мины от времени

зуемого программного обеспечения не является обязательным и допускает корректировки.

Использование описанной методики в ходе разработки перспективных удлиненных зарядов разминирования позволит повысить качество обоснования конструкторских решений и создаст основание для сокращения объема полигонных испытаний.

Литература

1. The Military Balance 2021. The International Institute for Strategic Studies/Arundel House | 6 Temple Place | London | WC2R 2 PG | UK, ISBN 978-1-032101227-8, ISSN 0459-7222.

2. Средства инженерного вооружения: Каталог. Кн. 1, 2. Изд. второе, доп. — М.: ФГУП «ГосНИП «Расчет». 2016.

3. ANSYS Autodyn User's Manual.

4. Официальный сайт FreeCAD (Juergen Riegel's). 2021. URL: <https://www.freecadweb.org>. (Дата обращения 23.06.2021).

5. Техническое руководство ПК «Логос» (из состава дистрибутива ПМК «Двойник-ПС» — версия 5.3.19, сборка 2399). — Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2020.

6. Официальный сайт ЗАО «Автомеханика»: [Электронный ресурс]. 2021. URL: <http://www.euler.ru>. (Дата обращения 23.06.2021).

7. Справочник под общей редакцией Вереева Ю.Г. «Сапер». 2022. URL: <http://saper.isnet.ru> (Дата обращения 23.06.2021).

8. Валецкий О. Иностранные мины на Ближнем и Среднем Востоке и в Северной Африке. — М.: Центр стратегических оценок и прогнозов. 2007.

9. Jane's Mines and Mine Clearance 1999–2000 (Editor of Jane's Mines and Mine Clearance at Jane's Information Group Colin King).

10. L. Xi, W. Bo-Liang, H. Zao, Z. Ningning. Numerical Simulation of Thermobaric Explosive Explosion in Free Field // Applied Mechanics and Materials. Vols 687–691. P. 696–700.