

УДК 519.6

DOI: 10.53403/9785951505309_2022_27_1_236

Сопряженные расчеты движения в упругопластических средах малодеформируемых тел с определением их НДС

Представлена технология проведения сопряженных расчетов движения в упругопластических средах малодеформируемых тел с определением их напряженно-деформированного состояния. Расчеты проводятся по методике ЭГАК и пакету программ ЛОГОС. Приведено описание методики сопряжения расчетов и результаты тестовых расчетов по ней. Тестирование проводилось на модельных задачах внедрения малодеформируемых ударников в различные преграды и опыте по внедрению в преграду из мягкого грунта зонда-проникателя MoonLITE.

**А. А. Краюхин, В. А. Афанасьев,
В. В. Борляев, Д. Ю. Дьянов,
И. А. Еричева, М. В. Беженцева
(Скобеева), А. Л. Стадник**

Введение

Численное моделирование высокоскоростного внедрения проникателя в преграду с учетом мелкомасштабных особенностей его внутренней конструкции – комплексная трудоемкая задача, в которой необходимо одновременно рассчитывать течение вещества преграды с большими деформациями и напряженно-деформированное состояние (НДС) проникателя, элементы конструкции которого обычно деформируются в упругой области. Для эффективного решения данной задачи применяются численные методики, сочетающие различные подходы для описания областей с большими и малыми деформациями. Течение вещества преграды целесообразно рассчитывать на неподвижной счетной сетке, а деформацию проникателя – на подвижной [1]. Аналогичный подход используется в расчетах взаимодействия сейсмозрывных волн с подземными сооружениями [2].

Рассмотрим случай, когда корпус проникателя при заглублении испытывает незначительные деформации, мало влияющие на процесс внедрения. Тогда задача решается с помощью последовательных расчетов внедрения и определения НДС, когда результаты первого расчета служат граничными условиями для второго. (Такие расчеты будем называть сопряженными.) В данном случае граничным условием является напряжение на корпусе проникателя, действующее

щее на него в процессе заглублиения. Предположение о незначительной деформации корпуса проникателя позволяет в расчете внедрения считать его абсолютно твердым телом без конкретизации внутренней структуры.

Для расчета движения абсолютно твердого тела в упругопластической среде на неподвижной счетной сетке был предложен и реализован в методике ЭГАК [3] метод BODY-3D [4]. При его применении численное моделирование течения вещества преграды проводится в неинерциальной системе отсчета, относительно которой проникающее тело неподвижно. Данный подход предлагается использовать на первом этапе для расчета внедрения проникателя в преграду. Расчет НДС проникателя от нагрузки, действующей на него при заглублиении, предлагается проводить с помощью модуля динамической прочности пакета программ ЛОГОС [5].

Метод BODY-3D тестировался в опытах, связанных с движением малодеформируемых тел в прочных средах [6], и продемонстрировал работоспособность и приемлемую точность. Тестирование пакета программ ЛОГОС проводилось на значительном объеме задач различных классов [5].

В данной работе основное внимание уделяется результатам тестирования технологии определения НДС проникателя в условиях внедрения посредством сопряженных расчетов по методике ЭГАК и пакету программ ЛОГОС.

Определение граничного условия для расчета НДС проникателя

В методике ЭГАК обычно применяется прямоугольная неподвижная счетная сетка. Для описания вещества абсолютно твердого тела используется специальный компонент – *solid*. Грани ячеек с этим компонентом являются жесткими стенками. Для упрощения вычисления сил, действующих на поверхность проникающего тела со стороны преграды, перед началом расчета производится очистка смешанных ячеек с веществом *solid* [4]. Смешанные ячейки освобождаются от него или заполняются им полностью в зависимости от его объемной концентрации. На рис. 1 (см. также цв. вкл.) изображены поля веществ до и после процедуры очистки. Линией показан реальный контур проникающего тела.

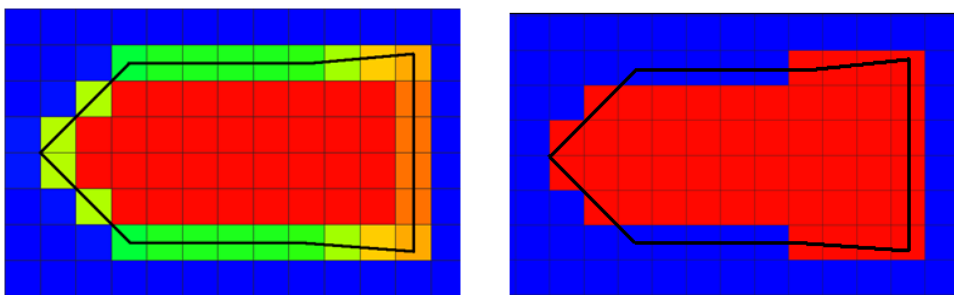


Рис. 1. Поле веществ до и после корректировки начальных данных

После процедуры очистки во всех счетных ячейках, граничащих с веществом *solid*, размещаются датчики, в которых в процессе счета накапливается напряжение. Параллельно создается файл с координатами датчиков. Так как численное моделирование процесса внедрения проводится в системе отсчета, в которой проникатель покоится относительно счетной сетки, то координаты датчиков не меняются на протяжении всего расчета. В процессе счета в отдельные файлы записываются давление P и компоненты девиатора тензора напряжений S_{xx} и S_{yy} в зависимости от вре-

мени. Эти результаты являются исходными данными для определения граничного условия для расчета НДС проникателя.

Для расчета НДС проникателя строится его конечно-элементная (КЭ) модель необходимой степени подробности. Так как в расчетах применяются различные счетные сетки, то сначала проводится процедура интерполяции накопленных величин P , S_{xx} и S_{yy} со счетной сетки ЭГАЗ на сетку ЛОГОС. Далее определяется граничное напряжение. Для этого для каждой внешней грани КЭ-модели строится локальная система координат. В качестве первого вектора локальной системы координат \vec{n}_1 задается нормаль к грани. Вторым вектором \vec{n}_2 выступает диагональ грани. Третий вектор $\vec{n}_3 = [\vec{n}_1 \times \vec{n}_2]$. Так как направляющие векторы локальной системы координат в общем случае не совпадают с направляющими векторами системы координат xuz , в которой проводился расчет проникания, то выполняется процедура пересчета напряжений по формулам [7]:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x n_{1x}^2 + \sigma_y n_{1y}^2 + \sigma_z n_{1z}^2, \\ \sigma_2 &= \sigma_x n_{1x} n_{2x} + \sigma_y n_{1y} n_{2y} + \sigma_z n_{1z} n_{2z}, \\ \sigma_3 &= \sigma_x n_{1x} n_{3x} + \sigma_y n_{1y} n_{3y} + \sigma_z n_{1z} n_{3z}.\end{aligned}$$

Здесь $\sigma_x = P - S_{xx}$, $\sigma_y = P - S_{yy}$, $\sigma_z = P + S_{xx} + S_{yy}$ – напряжения в системе координат xuz . Таким образом, для каждого граничного сегмента КЭ-модели рассчитываются зависимости трех составляющих внешней нагрузки от времени σ_1 , σ_2 , σ_3 , действующих вдоль векторов \vec{n}_1 , \vec{n}_2 , \vec{n}_3 .

Расчеты наклонного внедрения компактного ударника

Рассмотрим задачу о наклонном внедрении компактного ударника в алюминиевую преграду с высокой скоростью. Численно задача решалась по алгоритму, представленному выше. Ударник – однородное осесимметричное тело с наконечником в виде конуса, цилиндрической средней частью и конусообразной стабилизирующей «юбкой». Координаты угловых точек сечения проникателя плоскостью симметрии (в см): 1 – (0, 0), 2 – (10, 10), 3 – (30, 10), 4 – (44, 12), 5 – (44, -12), 6 – (30, -10), 7 – (10, -10). Плотность вещества проникателя $\rho_0 = 8 \text{ г/см}^3$, скорость соударения $V_0 = V_x = 2 \text{ км/с}$, угол подхода ударника к поверхности преграды $\theta = 35^\circ$, угол атаки полагался нулевым. Расчеты проникания проводились на кубической неподвижной счетной сетке с размером ячейки $h = 0,5 \text{ см}$. Число датчиков на поверхности проникателя 5633. Для описания вещества преграды использовались УРС в форме Ми – Грюнайзена ($\rho_0 = 2,71 \text{ г/см}^3$, $c_0 = 5,3 \text{ км/с}$, $n = 4$ и $\Gamma = 1,2$) и приближение идеального упругопластического тела с коэффициентом Пуассона $\nu = 0,32$ и пределами текучести $Y = 0$ и $0,5 \text{ ГПа}$. В расчетах НДС для описания ударника использовали два приближения: абсолютно твердого и упругого тела с параметрами $E = 200 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,29$. При создании КЭ-модели ударника применялись линейные объемные восьмиузловые элементы сплошной среды с характерным размером $h = 0,5 \text{ см}$.

На рис. 2 (см. также цв. вкл.) приведены результаты расчетов на момент времени $t = 0,9 \text{ мс}$ для преграды с пределом текучести $Y = 0$. Из рисунка видно, что в расчете НДС конфигурация области с ненулевым нормальным напряжением на поверхности ударника согласуется с картиной обтекания ударника веществом преграды. Граничное напряжение присутствует только в местах контакта ударника и преграды.

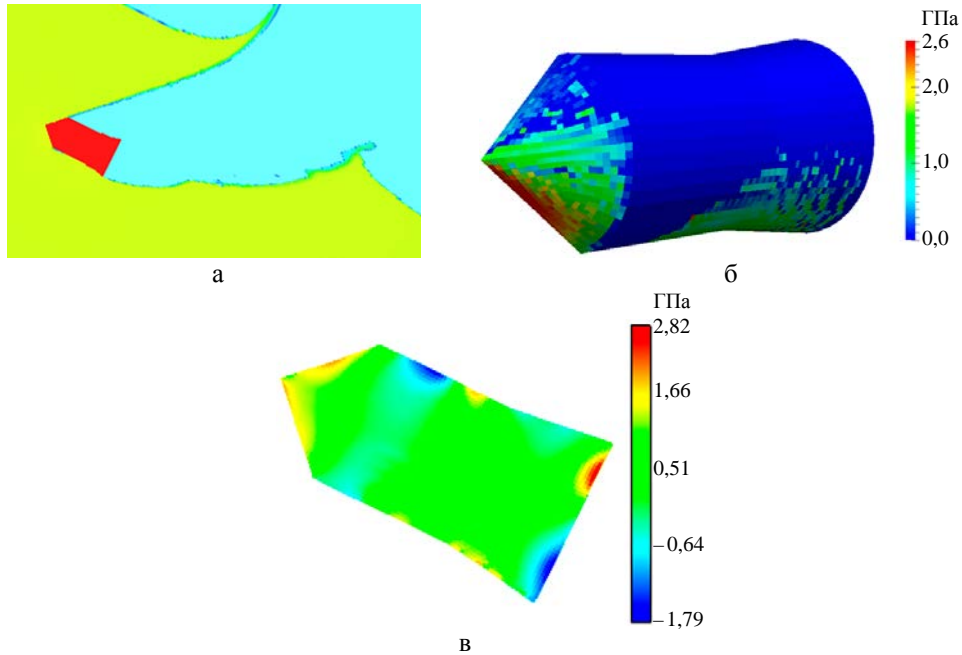


Рис. 2. Результаты расчетов: а – картина проникания, б – распределение нормального напряжения на поверхности проникателя, в – поле давления в проникателе

На рис. 3–5 (см. также цв. вкл.) приведены зависимости продольного и поперечного ускорения торможения ударника, а также угла между осью симметрии ударника и осью стрельбы от времени.

Видно, что во всех расчетах получены близкие результаты. В расчетах по пакету программ ЛОГОС с упругим телом присутствуют колебания на зависимостях ускорения торможения ударника от времени, связанные с рециркуляцией упругих волн по проникателю. Несмотря на это, средние значения ускорения торможения, полученные расчетах, близки друг к другу.

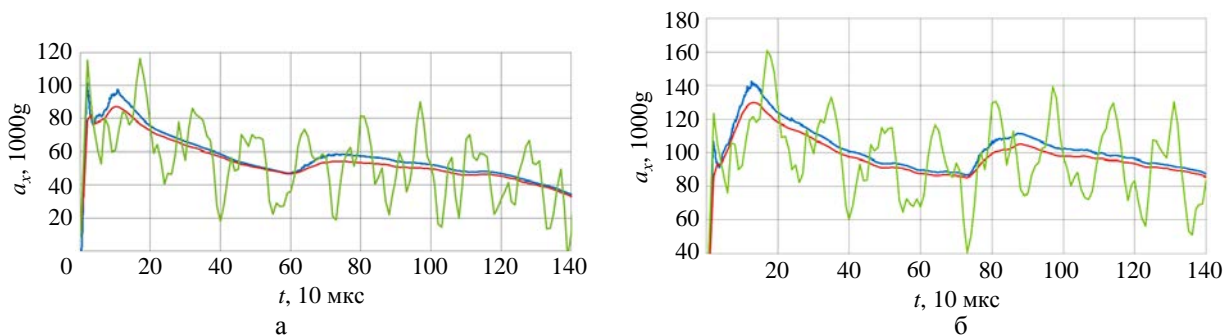


Рис. 3. Зависимости продольного ускорения торможения ударника от времени:
 — ЭГАК (твердое тело); — ЛОГОС (твердое тело); — ЛОГОС (упругое тело);
 а – преграда с $Y = 0$ ГПа; б – преграда с $Y = 0,5$ ГПа

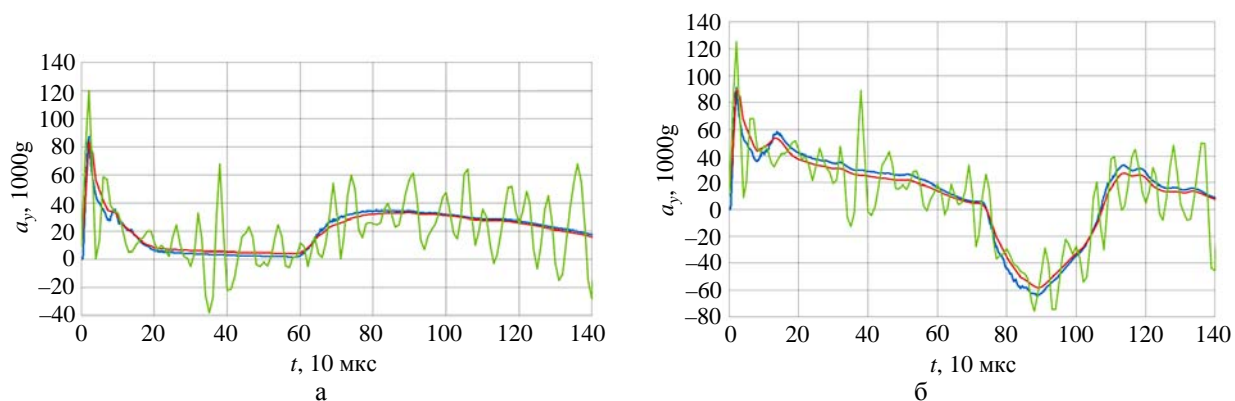


Рис. 4. Зависимости поперечного ускорения торможения ударника от времени:
 — ЭГАК (твердое тело); — ЛОГОС (твердое тело); — ЛОГОС (упругое тело);
 а – преграда с $Y = 0$ ГПа; б – преграда с $Y = 0,5$ ГПа

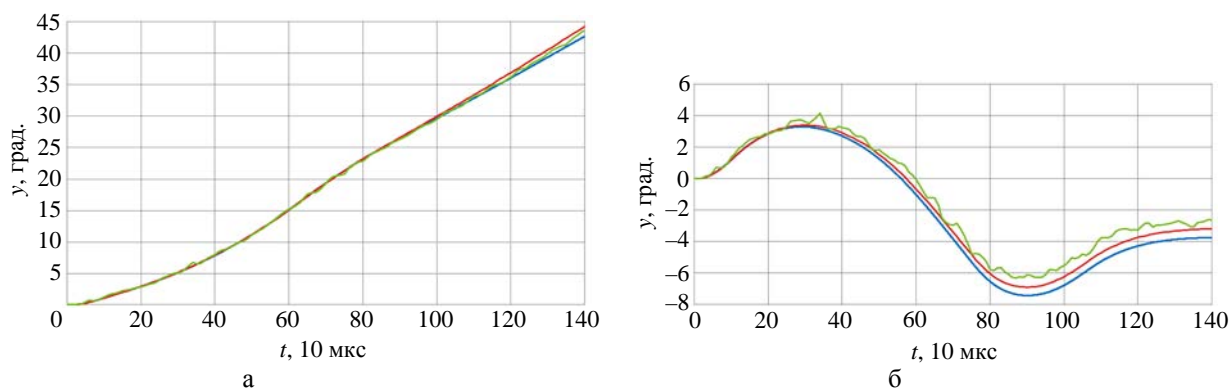


Рис. 5. Зависимости угла поворота ударника от времени: — ЭГАК (твердое тело);
 — ЛОГОС (твердое тело); — ЛОГОС (упругое тело); а – преграда с $Y = 0$ ГПа;
 б – преграда с $Y = 0,5$ ГПа

Расчеты опытов по внедрению проникателя MoonLITE в песок

В рамках миссии MoonLITE [8] для изучения Луны разрабатывался проникатель длиной $L = 56$ см и массой $M = 13$ кг, обладающий возможностью заглубления в лунный грунт. Внешне проникатель представлял собой осесимметричное тело с оживальным наконечником, цилиндрической средней частью и конусообразной стабилизирующей «юбкой» (рис. 6, см. также цв. вкл.). Были проведены эксперименты [9], в которых исследовалось нормальное внедрение в сухой песок полномасштабных макетов проникателя со скоростью $0,3$ км/с и углом атаки $\alpha = 6-8^\circ$.

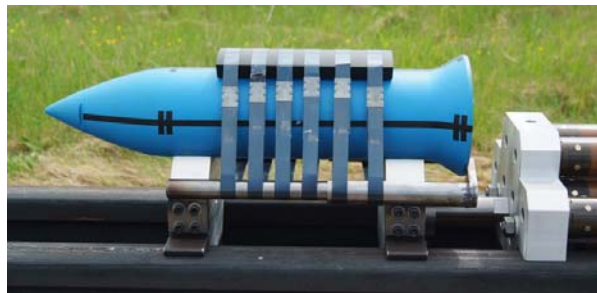
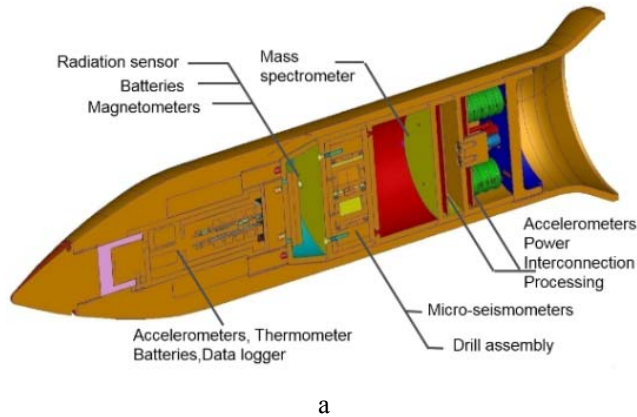


Рис. 6. Внутренняя структура (а) и вид сбоку (б) проникателя MoonLITE

Была разработана КЭ-модель проникателя, показанная на рис. 7 (см. также цв. вкл.).

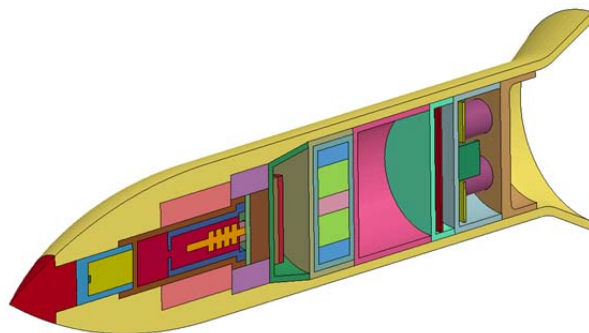


Рис. 7. КЭ-модель проникателя MoonLITE

Расчет проникания проводился по методике ЭГАК на неподвижной кубической счетной сетке с размером ячейки $h = 0,285$ см. Для описания ударника применялся метод BODY-3D (приближение абсолютно твердого тела). Число датчиков на поверхности проникателя составило 11476. Для описания песка использовалась упругопластическая релаксационная модель [10]. Параметры для определения предела текучести и динамической ветви диаграммы деформирования песка брались из [11], остальные параметры рассчитывались по формулам, рекомендованным в [10]. Скорость соударения составляла 0,3 км/с, угол атаки $\alpha = 8^\circ$, угол подхода $\theta = 90^\circ$.

В КЭ-модели проникателя приборы представлялись в виде однородных массогабаритных макетов. Характерный размер ячейки счетной сетки $h = 0,1$ см (число конечных элементов 400 тыс.). Для описания элементов конструкции проникателя использовалось приближение упругого тела. Внешний корпус моделировался алюминиевым сплавом с параметрами $\rho_0 = 2,64$ г/см³, $E = 68$ ГПа, $\nu = 0,32$, макеты приборов – сталью с параметрами $\rho_0 = 7,85$ г/см³, $E = 214$ ГПа, $\nu = 0,3$. Масса КЭ-модели соответствовала своему реальному значению $M = 13$ кг.

На рис. 8 (см. также цв. вкл.) приведены результаты расчетов на разные моменты времени: верхний ряд – картина проникания, средний ряд – распределение нормального напряжения на поверхности проникателя, нижний ряд – интенсивность касательных напряжений. Распределение напряжения на поверхности наконечника с течением времени практически не менялось: максимальное на вершине, оно уменьшалось до нуля при переходе к цилиндрической части. Напротив, взаимодействие грунта с «юбкой» носило существенно нестационарный характер. При прохождении поверхности грунта на момент времени $t = 2$ мс реализовался удар по нижней части «юбки», а затем после стабилизации проникателя при $t = 5$ мс – удар по верхней части «юбки». Затем процесс повторялся. Наибольшие напряжения вначале реализовались в передней части проникателя, потом зона максимальных напряжений сместилась к хвостовой части проникателя из-за взаимодействия «юбки» со стенками каверны.

На рис. 9 (см. также цв. вкл.) показаны зависимости продольного ускорения торможения проникателя от времени, полученные в одном из опытов и в расчетах. В расчетах ускорение торможения определялось для центра масс всего проникателя. Отметим, что между представленными данными наблюдается хорошее согласие как по форме, так и по амплитуде зависимости $a_x(t)$. Максимальное отличие для средних значений составило 10–15 %.

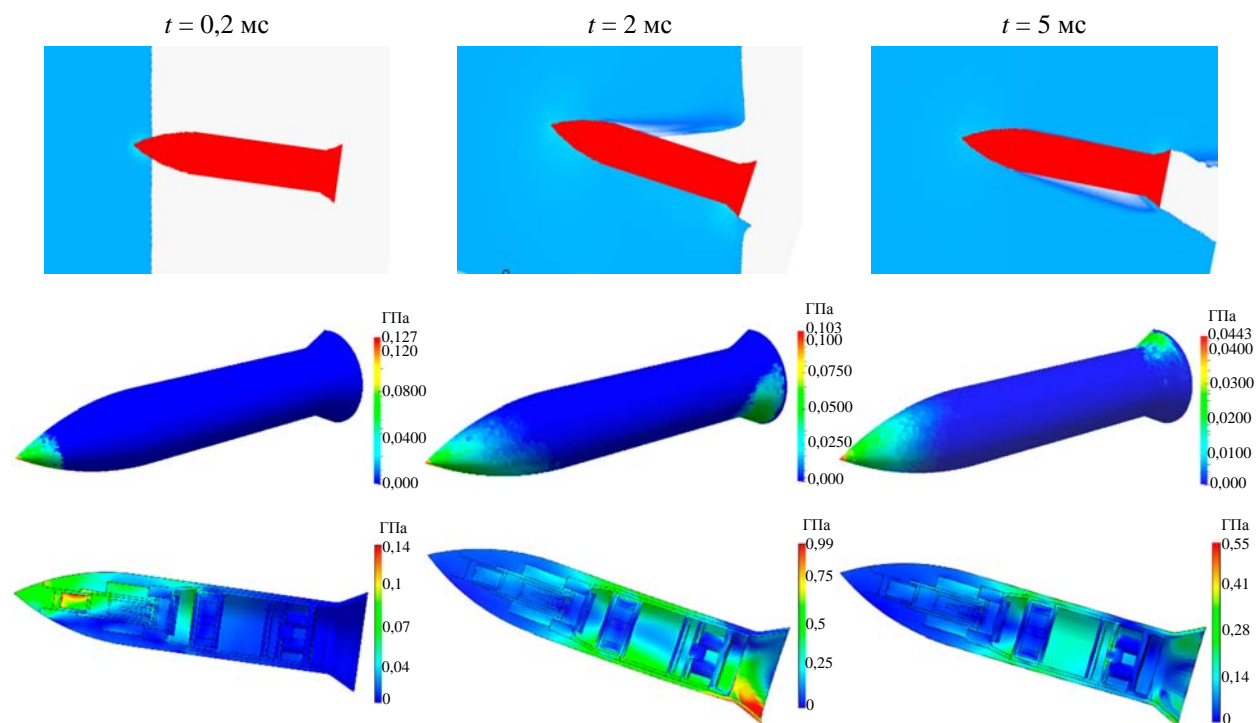


Рис. 8. Результаты расчетов

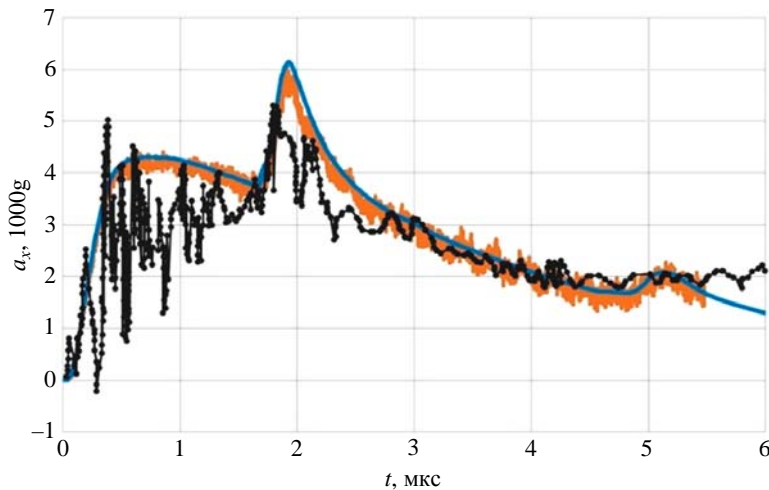


Рис. 9. Зависимость продольного ускорения торможения проникающего тела от времени:
 — расчет ЛОГОС, — расчет ЭГАК, ● — опыт

Заключение

Разработана технология проведения сопряженных расчетов внедрения малодеформируемых тел в прочные преграды с определением их НДС. Расчет внедрения проводился по методике ЭГАК в трехмерной постановке на неподвижной счетной сетке с описанием проникающего тела в приближении абсолютно твердого тела. Расчет НДС проникающего тела в условиях внедрения проводился по модулю динамической прочности пакета программ ЛОГОС. При этом применялась КЭ-модель проникающего тела необходимой степени подробности. Нагружение проникающего тела в расчете НДС осуществлялось с помощью задания граничного условия на его поверхности в виде внешнего напряжения, рассчитанного с использованием данных первого расчета.

Тестирование технологии проводилось на задачах внедрения малодеформируемых ударников в различные преграды. Результаты верификационных расчетов хорошо согласуются друг с другом. С использованием технологии проведены расчеты опытов по внедрению в преграду из песка лунного зонда-проникателя MoonLITE. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с опытными данными.

Список литературы

1. Линник Е. Ю., Котов В. Л., Константинов А. Ю. Сравнительный анализ сил сопротивления внедрению конических и пирамидальных тел в упругопластическую среду // Проблемы прочности и пластичности. 2017. Т. 79, № 3. С. 338–347.
2. Koneshwaran S., Thambiratnam D. P., Gallage C. Blast response of segmented bored tunnel using coupled SPH-FE method // Structures. 2015. Vol. 2. P. 58–71.

3. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Бондаренко Ю. А. и др. Эйлеравы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных течений многокомпонентной среды // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2008. Вып. 12. С. 54–65.
4. Краюхин А. А., Янилкин Ю. В., Стадник А. Л., Егужева М. Ю. Метод расчета движения абсолютно твердого тела в упругопластической среде на неподвижной счетной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2018. Вып. 1. С. 15–29.
5. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Там же. С. 3–14.
6. Краюхин А. А., Стадник А. Л., Янилкин Ю. В. Численное моделирование движения жестких ударников в упругопластических средах на неподвижной счетной сетке по методике ЭГАК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2019. Вып. 1. С. 19–32.
7. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. I. – М.: Наука, 1975.
8. Gao Y., Phipps A., Taylor M. et al. Lunar science with affordable small spacecraft technologies: MoonLITE and Moonraker // Planetary and Space Science. 2008. Vol. 56. P. 368–377.
9. Gowen R., Smith A., Winter B. et al. An update on MoonLITE // IAC. 2008. Vol. 7. P. 4359–4369.
10. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. – М.: Наука, 1990.
11. Брагов А. М., Баландин Вл. В., Котов В. Л., Баландин Вл. Вл. Исследование динамических свойств водонасыщенного песка по результатам обращенных экспериментов // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 4. С. 545–554.

The Coupled Simulations of Rigid Bodies Moving in Elastoplastic Media and Their Mode of Deformation

A. A. Krayukhin, V. A. Afanas'ev, V. V. Borlyayev, D. Yu. D'yanov, I. A. Yericheva,
M. V. Bezhentseva (Skobeeva), A. L. Stadnik

This paper presents a technology for coupled simulations of rigid bodies moving in elastoplastic media and their mode of deformation. The simulations are done using the code EGAK and the software package LOGOS. The paper describes the coupling technique and the results of its test simulations. The testing was performed on benchmark problems of rigid projectile penetration into various targets and the MoonLITE soft soil penetration experiment.