

УДК 519.6

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-83-3-328-338

**СОПРЯЖЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ДВИЖЕНИЯ  
В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕДАХ  
МАЛОДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ  
ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

© 2020 г. **Краюхин А.А., Борляев В.В., Дьянов Д.Ю.,  
Скобеева М.В., Стадник А.Л.**

*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
Саров, Российская Федерация*

dydyanov@vniief.ru

*Поступила в редакцию 14.01.2020*

Представлена технология проведения сопряженных расчетов движения в упругопластических средах малодеформируемых тел с определением их напряженно-деформированного состояния. Расчет внедрения ударника в преграду проводится на неподвижной счетной сетке с использованием для описания ударника приближения абсолютно твердого тела без конкретизации его внутренней структуры. Течение окружающей среды рассчитывается в неинерциальной системе отсчета, связанной с неподвижным ударником. Расчет напряженно-деформированного состояния ударника проводится с помощью пакета программ ЛОГОС на лагранжевой счетной сетке. Используется конечно-элементная модель ударника необходимой степени подробности с учетом реальных упругопластических свойств материалов элементов конструкции ударника. Нагружение проникающего тела осуществляется с помощью задания на внешней поверхности его прочного корпуса силового граничного условия, рассчитанного на основе данных, полученных в первом расчете. Приведены описание методики сопряжения расчетов и результаты тестовых расчетов по ней. Тестирование проводилось на модельных задачах внедрения малодеформируемых ударников в различные преграды. Показано, что результаты тестовых расчетов с применением разработанной технологии хорошо согласуются с прямым моделированием на неподвижной счетной сетке. В качестве примера использования технологии представлены результаты расчета опыта по внедрению в преграду из мягкого грунта зонда-проникателя MoonLITE. Проникатель разрабатывался в рамках миссии MoonLITE для изучения Луны и обладает возможностью заглупления в лунный грунт. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, максимальное отличие для средних значений ускорения торможения проникающего тела составляет 10–15%.

*Ключевые слова:* проникание, абсолютно твердое тело, напряженно-деформированное состояние, зонд-проникатель MoonLITE, пакет программ ЛОГОС.

## Введение

Численное моделирование высокоскоростного внедрения проникателя в преграду с учетом мелкомасштабных особенностей его внутренней конструкции является комплексной задачей, решение которой весьма трудоемко. Основная сложность связана с необходимостью одновременно рассчитывать течение вещества преграды с большими деформациями и напряженно-деформированное состояние (НДС) самого проникателя, элементы конструкции которого обычно деформируются в упругой области. Для эффективного решения подобных задач необходимо использовать численные методики, сочетающие в себе различные подходы для описания областей с большими и малыми деформациями. Течение вещества преграды целесообразно рассчитывать на неподвижной счетной сетке, а деформацию проникателя – на подвижной сетке [1, 2]. Аналогичный подход используется в расчетах взаимодействия сейсмозрывных волн с подземными сооружениями [3, 4].

В настоящей статье ограничимся случаем, когда корпус проникателя при заглаблении испытывает незначительные деформации, мало влияющие на процесс внедрения. Тогда решение этой задачи можно получить с помощью последовательного проведения расчетов внедрения и определения НДС, используя результаты первого расчета в качестве граничных условий для второго. В рассматриваемом случае граничным условием является напряжение на корпусе проникателя, действующее на него в процессе заглабления. Такие расчеты будем называть сопряженными. 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 [5] метод BODY-3D [6]. При его использовании численное моделирование течения вещества преграды проводится в неинерциальной системе отсчета, относительно которой проникающее тело неподвижно. Этот подход предлагается использовать на первом этапе для расчета внедрения проникателя в преграду. Расчет НДС проникателя от нагрузки, действующей на него при заглаблении, предлагается проводить с помощью модуля динамической прочности пакета программ ЛОГОС [7, 8], построенного на основе пакета программ ЛЭГАК-ДК [9, 10].

Тестирование метода BODY-3D [11] осуществлялось на опытах [12, 13], связанных с движением малодеформируемых тел в прочных средах. Результаты расчетов показали его работоспособность и приемлемую точность. Тестирование пакета программ ЛОГОС проводилось на значительном количестве задач различных классов [7–10]. В настоящей статье основное внимание уделено 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» [6]. Смешанные ячейки или освобождаются от него, или запол-

няются им полностью в зависимости от величины его объемной концентрации. На рис. 1 изображены поля веществ до и после процедуры очистки. Линией нанесен реальный контур проникающего тела.

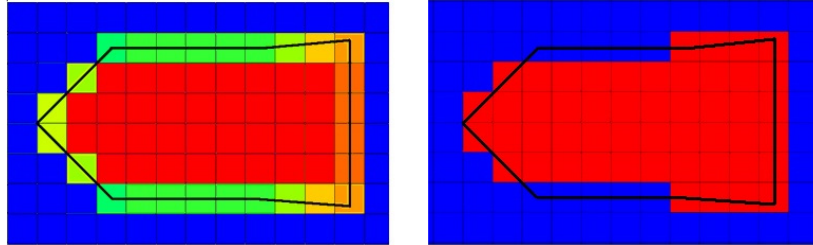


Рис. 1. Поле веществ до и после корректировки начальных данных

После процедуры очистки во всех счетных ячейках, граничащих с веществом «solid», размещаются датчики, в которых в процессе счета накапливается напряжение в зависимости от времени. При этом 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 времени. Эти результаты являются исходными данными для определения граничного условия для расчета НДС проникателя. В расчете проникания сила трения между веществом преграды и поверхностью ударника не учитывается. В связи с этим касательные компоненты силы сопротивления внедрению ударника полагаются равными нулю и не используются в дальнейшем при расчете его НДС.

Для расчета НДС проникателя строится его конечно-элементная модель (КЭ-модель) необходимой степени подробности. Так как в расчетах используются разные счетные сетки, то сначала проводится процедура интерполяции накопленных величин  $P$ ,  $S_{xx}$  и  $S_{yy}$  со счетной сетки ЭГАС на сетку ЛОГОС. Далее непосредственно происходит определение самого граничного напряжения. Для этого для каждой внешней грани КЭ-модели строится локальная система координат. В качестве первого вектора локальной системы координат  $\mathbf{n}_1$  задается нормаль к грани. Вторым вектором  $\mathbf{n}_2$  выступает диагональ грани. Третий вектор получается как  $\mathbf{n}_3 = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2$ . В связи с тем, что направляющие векторы локальной системы координат в общем случае не совпадают с направляющими векторами системы координат  $xuz$ , в которой проводился расчет проникания, то осуществляется процедура пересчета напряжений по формулам [14]:

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

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 компонент внешней нагрузки от времени  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , действующих вдоль векторов  $\mathbf{n}_1$ ,  $\mathbf{n}_2$ ,  $\mathbf{n}_3$ .

## Расчеты наклонного внедрения компактного ударника

В качестве теста рассмотрена задача о наклонном внедрении с высокой скоростью компактного ударника в алюминиевую преграду. Численное решение задачи проводилось по технологии, представленной выше. Ударник представлял собой однородное осесимметричное тело с наконечником в виде конуса, цилиндрической средней частью и конусообразной стабилизирующей «юбкой». Координаты угловых точек сечения проникателя плоскостью симметрии равны (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  $h = 0,5 \text{ см}$ . Количество датчиков на поверхности проникателя – 5633. Для описания вещества преграды использовались уравнения состояния (УРС) в форме Ми – Грюнайзена с  $\rho_0 = 2,71 \text{ г/см}^3$ , объемной скоростью звука  $c_0 = 5,3 \text{ км/с}$ , эмпирическим параметром  $n = 4$  и коэффициентом Грюнайзена  $\Gamma = 1,2$  и приближение идеального упругопластического тела с коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,32$  и пределами текучести  $Y$ , равными нулю и  $0,5 \text{ ГПа}$ . В расчетах НДС для описания ударника использовались два приближения: абсолютно твердого и упругого тел 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 изображены результаты расчетов в момент времени  $t = 0,9 \text{ мс}$  для преграды с пределом текучести  $Y = 0$ . Из представленных данных 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.

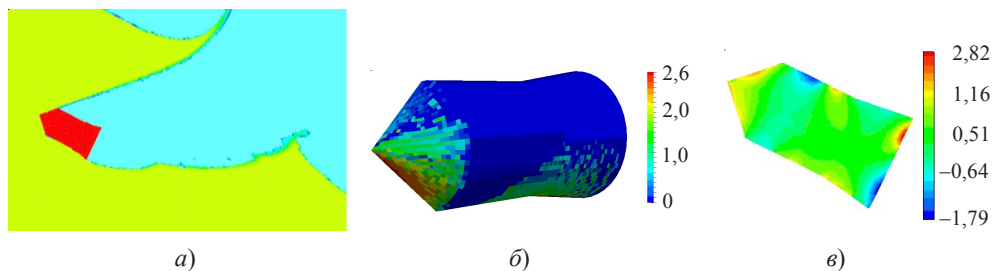


Рис. 2. Результаты расчетов: а) картина проникания, б) распределение нормального напряжения на поверхности проникателя в ГПа, в) поле давления в проникателе в ГПа

На рис. 3–5 приведены зависимости продольного и поперечного ускорений торможения ударника, а также угла между осью симметрии ударника и осью стрельбы от времени (а – для преграды с  $Y = 0$ , б – для преграды с  $Y = 0,5 \text{ ГПа}$ ).

Из представленных рисунков видно, что во всех расчетах получены близкие результаты. Основное различие результатов заключается в наличии колебаний на зависимостях ускорения торможения ударника от времени, полученных в расчетах с помощью ЛОГОС для упругого тела. Эти колебания связаны с рециркуляцией упругих волн по проникателю. Тем не менее, средние значения ускорения торможения, полученные во всех расчетах, близки друг к другу.

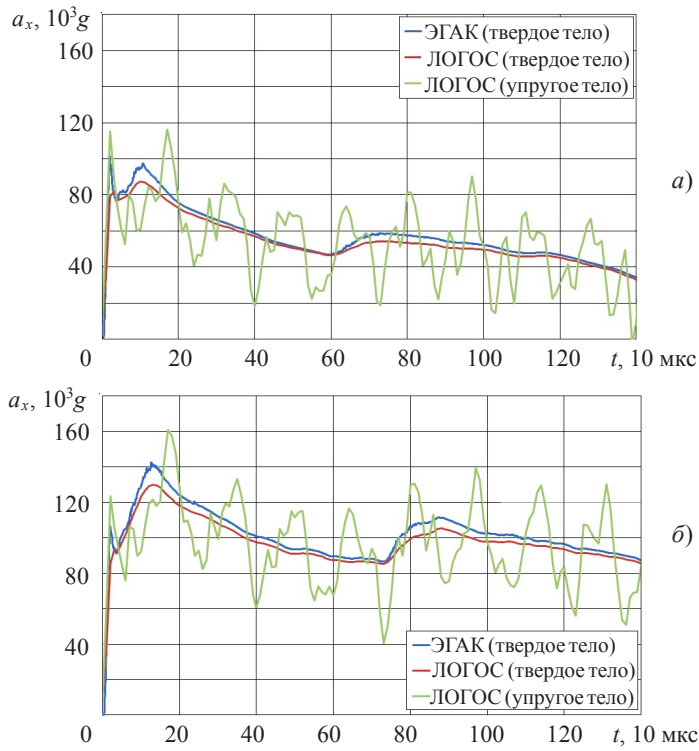


Рис. 3. Зависимости продольного ускорения торможения ударника от времени

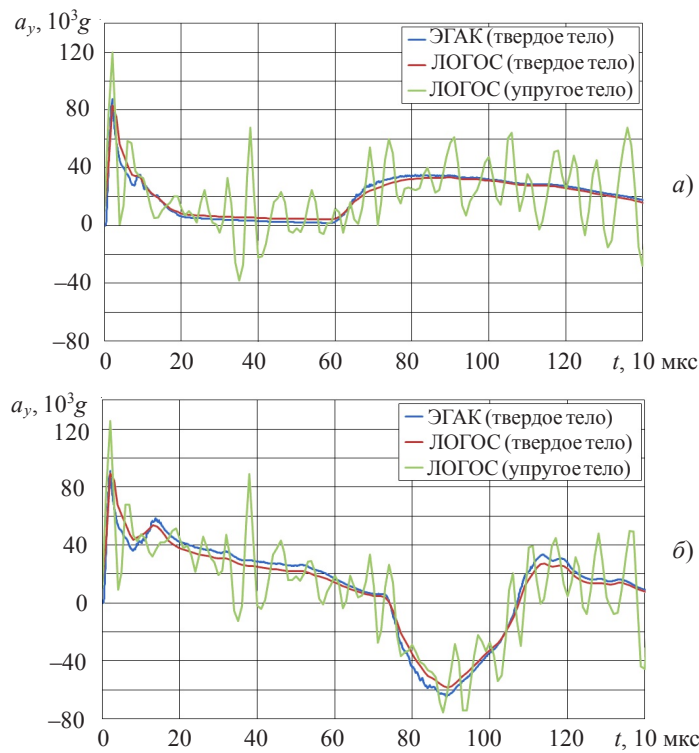


Рис. 4. Зависимости поперечного ускорения торможения ударника от времени

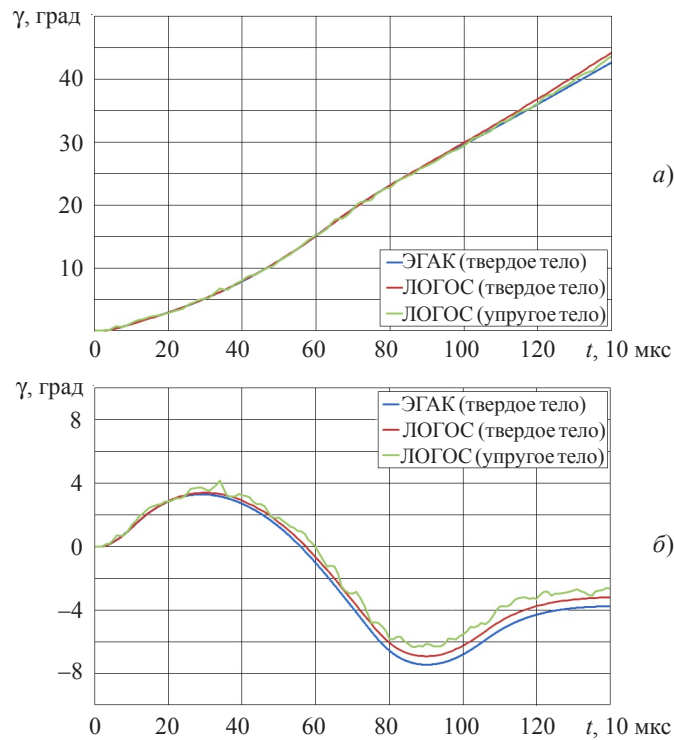


Рис. 5. Зависимости угла поворота ударника от времени

### Расчеты опытов по внедрению проникателя MoonLITE в песок

В рамках миссии MoonLITE [15, 16] 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». На рис. 6 изображены внутреннее устройство и вид проникателя сбоку. Были проведены эксперименты [17], в которых исследовалось нормальное внедрение в сухой песок полномасштабных макетов проникателя со скоростью  $0,3$  км/с и углом атаки  $\alpha = 6-8^\circ$ .

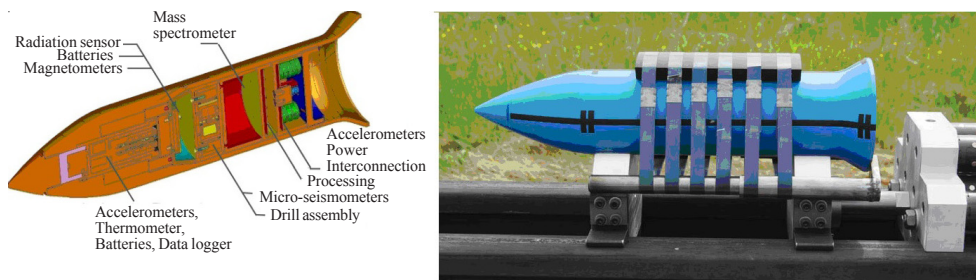


Рис. 6. Внутренняя структура и вид сбоку проникателя MoonLITE

С использованием имеющейся информации о внешнем виде проникателя и о его внутреннем устройстве была разработана его КЭ-модель, показанная на рис. 7.

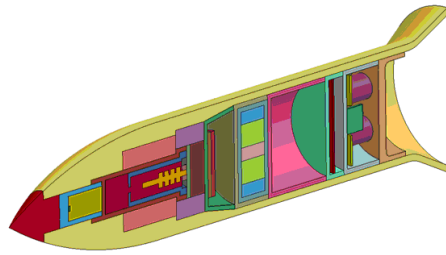


Рис. 7. КЭ-модель проникателя MoonLITE

Расчет проникания проводился по методике ЭГАК на неподвижной кубической счетной сетке с размером ячейки  $h = 0,285$  см. Для описания ударника применялось приближение абсолютно твердого тела (метод BODY-3D). На поверхности проникателя размещалось 11476 датчиков. Для описания песка использовалась упруго-пластическая релаксационная модель [18]. Параметры для определения предела текучести и динамической ветви диаграммы деформирования песка были взяты из [19, 20], остальные параметры рассчитывались по формулам, рекомендованным в [18]. Скорость соударения составляла 0,3 км/с, угол атаки  $\alpha = 8^\circ$ , угол подхода  $\theta = 90^\circ$ .

В КЭ-модели проникателя приборы были представлены в виде однородных массогабаритных макетов. Характерный размер счетной сетки  $h = 0,1$  см (количество 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/см<sup>3</sup>,  $E = 68$  ГПа,  $\nu = 0,32$ . Макеты приборов – сталью с параметрами  $\rho_0 = 7,85$  г/см<sup>3</sup>,  $E = 214$  ГПа,  $\nu = 0,3$ . Масса КЭ-модели соответствовала своему реальному значению  $M = 13$  кг.

На рис. 8 приведены результаты расчетов в разные моменты времени: *а* – картина проникания, *б* – распределение нормального напряжения на поверхности проникателя в ГПа, *в* – интенсивность касательных напряжений в ГПа.

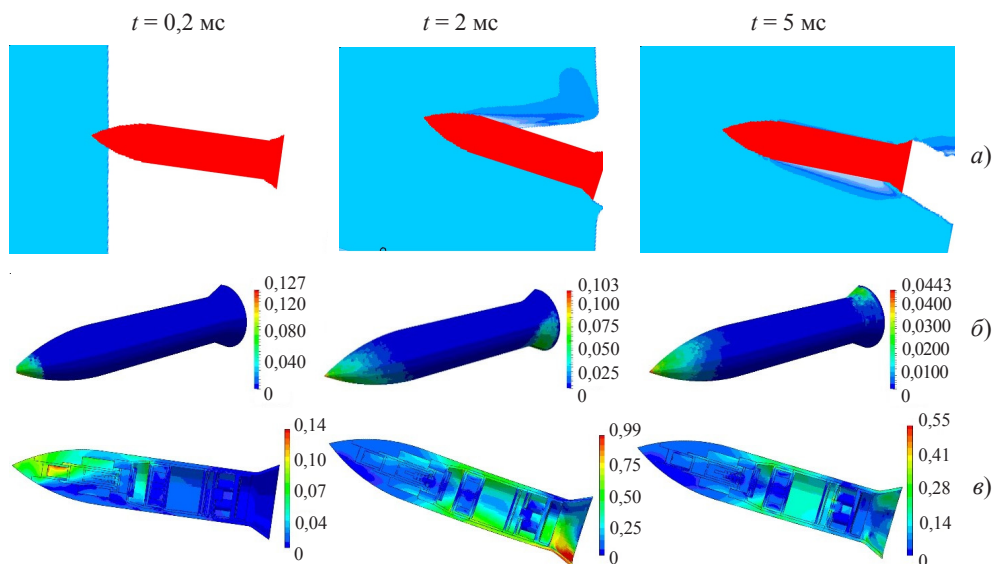


Рис. 8. Результаты расчетов

Распределение напряжения на поверхности наконечника с течением времени практически не менялось. Напряжение, максимальное на вершине, плавно уменьшалось до нуля при переходе к цилиндрической части. Напротив, взаимодействие грунта с «юбкой» имело существенно нестационарный характер. При прохождении поверхности грунта в 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». Далее этот процесс повторялся. Наибольшие напряжения сначала реализовались в передней части проникателя. Далее зона максимальных напряжений сместилась к хвостовой части проникателя из-за взаимодействия «юбки» со стенками каверны.

На рис. 9 изображены 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%.

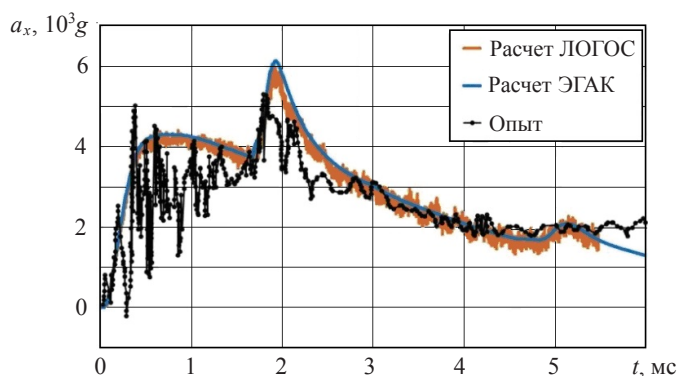


Рис. 9. Зависимость продольного ускорения торможения проникателя от времени

### Заключение

Разработана технология проведения сопряженных расчетов внедрения малодеформируемых тел в прочные преграды с определением их НДС. Расчет внедрения проводится по методике ЭГАК в трехмерной постановке на неподвижной счетной сетке с описанием проникателя в приближении абсолютно твердого тела. Расчет НДС проникателя в условиях внедрения проводится по модулю динамической прочности пакета программ ЛОГОС. При этом используется КЭ-модель проникателя необходимой степени подробности. Нагружение проникателя в расчете НДС осуществляется с помощью задания граничного условия на его поверхности в виде внешнего напряжения, рассчитанного с использованием данных из 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, максимальное отличие для средних значений составило 10–15%.



#### 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. Rosenberg Z., Dekel E. The penetration of rigid long rods – revisited. *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36. Iss. 4. P. 551–564.
3. 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.
4. De A. Numerical simulation of surface explosion over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*. 2012. Vol. 43. P. 72–79. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.02.007.
5. Янилкин Ю.В., Беляев С.П., Бондаренко Ю.А. и др. Эйлеровы численные методики ЭГАК и ТРЭК для моделирования многомерных течений многокомпонентной среды. *Труды РФЯЦ – ВНИИЭФ*. 2008. Вып. 12. С. 54–65.
6. Краюхин А.А., Янилкин Ю.В., Стадник А.Л., Егужова М.Ю. Метод расчета движения абсолютно твердого тела в упругопластической среде на неподвижной счетной сетке. *ВАИТ. Сер. Мат. мод. физ. процессов*. 2018. Вып. 1. С. 15–29.
7. Дьянов Д.Ю., Спиридонов В.Ф., Цибереv К.В. и др. Пакет программ «ЛОГОС». Модуль решения динамических задач прочности. *ВАИТ. Сер. Мат. мод. физ. процессов*. 2018. Вып. 1. С. 3–14.
8. Varabanov R., Dyanov D., Tsiberev K., Spiridonov V. The code LOGOS for numerical analysis of nonlinear quasi-static strength problems. *Proceedings International Conference on Computational Science and Computational Intelligence*. 10–13 March 2014. Las Vegas, USA. 2014. P. 264–266.
9. Рябов А.А., Величко С.В., Волков А.Ю., Володина Н.А., Дьянов Д.Ю., Корсакова Е.И., Косарим С.С., Куделькин В.Г., Авдеев П.А., Артамонов М.В., Борляев В.В. Параллельный пакет программ ЛЭГАК-ДК для расчета задач гидрогазодинамики и прочности на неструктурированных сетках в лагранжево-эйлеровых переменных. *Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского*. 2011. Вып. 4(5). С. 2472–2473.
10. Tsiberev K., Spiridonov V., Dyanov D., Kukanov S. The finite element code LEGAK-DK and its application to numerical analysis of impact and thermal resistances of air transport package in hypothetical accident conditions. *Proceedings International Conference on Computational Science and Computational Intelligence*. 10–13 March 2014. Las Vegas, USA. 2014. P. 267–270.
11. Краюхин А.А., Стадник А.Л., Янилкин Ю.В. Численное моделирование движения жестких ударников в упругопластических средах на неподвижной счетной сетке по методике «ЭГАК». *ВАИТ. Сер. Мат. мод. физ. процессов*. 2019. Вып. 1. С. 19–32.
12. Piekutowski A.J., Forrestal M.J., Poormon K.L., Warren T.L. Perforation of aluminum plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impacts. *International Journal of Impact Engineering*. 1996. Vol. 18. Iss. 7-8. P. 877–887.
13. Осипенко К.Ю. Проникание тела вращения в упругопластическую среду. *Изв. РАН. МТТ*. 2009. №2. С. 169–180.
14. Филин А.П. *Прикладная механика твердого деформируемого тела*. Т. 1. М.: Наука, 1975. 832 с.
15. 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.
16. Gowen R.A., Smith A., Fortes A.D. et al. Penetrators for in situ investigations of Europe. *Advances in Space Research*. 2011. Vol. 48. Iss. 4. P. 725–742.
17. Gowen R., Smith A., Winter B., Theobald C., Rees K., Ball A., Hagermann A., Sherdian S., Brown P., Oddy T., Dougherty M., Church P., Gao Y., Jones A., Joy K. An update on MoonLITE. *59<sup>th</sup> International Astronautical Congress*. Glasgow, UK, 2008. Vol. 7. P. 4359–4369.
18. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. *Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред*. М.: Наука, 1990. 215 с.
19. Баженов В.Г., Котов В.Л. *Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред*. М.: Физматлит, 2011. 208 с.

20. 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.

#### References

1. Linnik E.Yu., Kotov V.L., Konstantinov A.Yu. Sravnitelnyy analiz sil soprotivleniyu vnedreniyu konicheskikh i piramidalnykh tel v uprugoplasticheskuyu sredu [Comparative analysis of resistance to the introduction of conical and pyramidal bodies to the elastic plastic environment]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 3. P. 338–347 (In Russian).
2. Rosenberg Z., Dekel E. The penetration of rigid long rods – revisited. *Int. J. Impact Engng.* 2009. Vol. 36. Iss. 4. P. 551–564.
3. 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.
4. De A. Numerical simulation of surface explosion over dry, cohesionless soil. *Comput. Geotech.* 2012. Vol. 43. P. 72–79. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.02.007.
5. Yanilkin Yu.V., Belyaev S.P., Bondarenko Yu.A. et al. Eylerovy chislennyye metodiki EGAK i TREK dlya modelirovaniya mnogomernykh techeniy mnogokomponentnoy sredy [Eulerian numerical techniques EGAK and TREK for simulation of multidimensional multimaterial flows]. *Trudy RFYaTs – VNIIEF [Proceedings of the RFNC – VNIIEF]*. 2008. Iss. 12. P. 54–65 (In Russian).
6. Krayukhin A.A., Yanilkin Yu.V., Stadnik A.L., Eguzhova M.Yu. Metod rascheta dvizheniya absolutno tverdogo tela v uprugoplasticheskoy srede na nepodvizhnoy schetnoy setke [A method for the simulation of a perfectly rigid body moving in elastoplastic medium using a fixed computational grid]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes]*. 2018. No 1. P. 15–29 (In Russian).
7. Dyanov D.Yu., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V. et al. Paket programm “LOGOS”. Modul resheniya dinamicheskikh zadach prochnosti [“LOGOS” program package. A module for solving the dynamic strength problems]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes]*. 2018. No 1. P. 3–14 (In Russian).
8. Barabanov R., Dyanov D., Tsiberev K., Spiridonov V. The code LOGOS for numerical analysis of nonlinear quasi-static strength problems. *Proceedings International Conference on Computational Science and Computational Intelligence*. 10–13 March 2014. Las Vegas, USA. 2014. P. 264–266.
9. Ryabov A.A., Velichko S.V., Volkov A.Yu., Volodina N.A., Dyanov D.Yu., Korsakova E.I., Kosarim S.S., Kudel'kin V.G., Avdeev P.A., Artamonov M.V., Borlyaev V.V. Parallelnyy paket programm LEGAK-DK dlya rascheta zadach gidrogazodinamiki i prochnosti na nestrukturirovannykh setkakh v lagranzhevo-eylerovykh peremennykh [The “LEGAK-DK” parallel codes for analyzing hydrodynamics and strength problems in Lagrangian–Eulerian variables on unstructured grids]. *Vestnik NNGU im. N.I. Lobachevskogo [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]*. 2011. Vol. 4. No 5. P. 2472–2473 (In Russian).
10. Tsiberev K., Spiridonov V., Dyanov D., Kukanov S. The finite element code LEGAK-DK and its application to numerical analysis of impact and thermal resistances of air transport package in hypothetical accident conditions. *Proceedings International Conference on Computational Science and Computational Intelligence*. 10–13 March 2014. Las Vegas, USA. 2014. P. 267–270.
11. Krayukhin A.A., Stadnik A.L., Yanilkin Yu.V. Chislennoe modelirovanie dvizheniya zhestkikh udarnikov v uprugoplasticheskikh sredakh na nepodvizhnoy schetnoy setke po metodike “EGAK” [Numerical simulation with the egak code of moving rigid penetrators in elasto-plastic media using a stationary computational grid]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov [Problems of Atomic Science and Technology. Series Mathematical Modeling of Physical Processes]*. 2019. No 1. P. 19–32 (In Russian).
12. Piekutowski A.J., Forrestal M.J., Poormon K.L., Warren T.L. Perforation of aluminum plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impacts. *Int. J. Impact Engng.* 1996. Vol. 18. Iss. 7-8. P. 877–887.

13. Osipenko K.Yu. Penetration of a body of revolution into elastoplastic medium. *Mechanics of Solids*. 2009. Vol. 44. Iss. 2. P. 311–321.
14. Filin A.P. *Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruemogo tela*. T. 1 [*Applied Mechanics of a Solid Deformable Body*. Vol. 1]. Moscow. Nauka Publ. 1975. 832 p. (In Russian).
15. Gao Y., Phipps A., Taylor M. et al. Lunar science with affordable small spacecraft technologies: MoonLITE and Moonraker. *Planet. Space Sci.* 2008. Vol. 56. P. 368–377.
16. Gowen R.A., Smith A., Fortes A.D. et al. Penetrators for in situ investigations of Europe. *Adv. Space Res.* 2011. Vol. 48. Iss. 4. P. 725–742.
17. Gowen R., Smith A., Winter B., Theobald C., Rees K., Ball A., Hagermann A., Sherdian S., Brown P., Oddy T., Dougherty M., Church P., Gao Y., Jones A., Joy K. An update on MoonLITE. *59<sup>th</sup> International Astronautical Congress*. Glasgow. UK. 2008. Vol. 7. P. 4359–4369.
18. Zamishlyayev B.V., Evterev L.S. *Modeli dinamicheskogo deformirovaniya i razrusheniya gruntovykh sred* [*Models of Dynamic Deformation and Destruction of Soil Environments*]. Moscow. Nauka Publ. 1990. 215 p. (In Russian).
19. Bazhenov V.G., Kotov V.L. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov udara i pronikaniya osesimmetrichnykh tel i identifikatsiya svoystv gruntovykh sred* [*Mathematical Modeling of Transient Processes of Impact and Penetration of Axisymmetric Bodies and Identification of Soil Properties*]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2011. 208 p. (In Russian).
20. Bragov A.M., Balandin VI.V., Kotov V.L., Balandin VI.VI. Issledovanie dinamicheskikh svoystv vodonasyshchennogo peska po rezultatam obrashchennykh eksperimentov [Study of dynamic properties of water-saturated sand by results of reverse experiments]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [*Technical Physics*]. 2018. Vol. 88. Iss. 4. P. 545–554 (In Russian).

#### **COUPLED CALCULATIONS OF WEAKLY DEFORMABLE BODIES MOVING IN ELASTOPLASTIC ENVIRONMENT AND DEFINING ITS MODE OF DEFORMATION**

**Krayukhin A.A., Borlyayev V.V., Dyanov D.Yu.,  
Skobeeva M.V., Stadnik A.L.**

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

This paper presents a technology of making coupled simulations of weakly deformable bodies moving in elastoplastic environment and defining its mode of deformation. Calculation of penetration of a projectile is made by EGAK methods on a fixed calculating mesh implying that the projectile is rigid and its inner structure is unimportant. Fluid flow is calculated in a noninertial base that is connected with the stationary projectile (using BODY-3D method). Mode of deformation of the projectile is calculated on a Lagrangian mesh using software package LOGOS. Finite-element model of the projectile with the required degree of detail is used with real elastoplastic material properties of its structural parts. Loading of the projectile is implemented with an assignment of force boundary condition on its outer surface. Methods of coupling calculations and test results are provided. In this paper, it is shown that test results obtained by this developed technology are in a good agreement with direct modeling on a fixed calculating mesh. As an example of using this technology, calculation results of a penetrator-probe MoonLITE intruding into a soft soil barrier are presented. This penetrator is developed within the scope of MoonLITE mission of studying the Moon and can deepen into moon soil. Results of numerical simulations are in a good agreement with the experimental data, maximum difference for average slow-down rate of the penetrator is 10–15%.

*Keywords:* penetration, rigid body, mode of deformation, penetrator-probe MoonLITE, software package LOGOS.