

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПАКЕТА LS-DYNA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Существование высокопроизводительных вычислительных средств, наличие необходимого математического и программного обеспечения позволяют считать математическое моделирование одним из наиболее эффективных способов оценки прочности, прогнозирования долговечности и оптимизации конструкций технологических процессов производства, в основе которых лежат процессы удара или взрыва. Одной из наиболее эффективных систем автоматизированного инженерного анализа (CAE-системой) является программа LS-DYNA.

LS-DYNA (LSTC) – многоцелевая программа, предназначенная для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных задач – механики деформированного твердого тела и теплопереноса, механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа. В настоящее время LS-DYNA считается лучшей коммерческой программой для решения задач соударения, взрыва, обработки металлов давлением и ряда других задач. В программе LS-DYNA реализованы эффективные методы решения перечисленных задач, в том числе явный и неявный метод конечных элементов, многокомпонентная гидродинамика (Multimaterial Eulerian Hydrodynamics), вычислительная гидродинамика несжимаемых потоков, бессеточный метод сглаженных частиц (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics), бессеточный метод, основанный на методе Галеркина (EFG – Element Free Galerkin method). В LS-DYNA реализованы процедуры автоматической перестройки и сглаживания конечно-элементной сетки при вырождении элементов – произвольные Лагранжево-Эйлеровы сетки (ALE – Arbitrary Lagrangian-Eulerian), высокоэффективные алгоритмы решения контактных задач, широкий набор моделей материалов, возможности пользовательского программирования, а также процедуры Лагранжево-Эйлерового связывания и расчета многокомпонентных течений сжимаемых сред на подвижных Эйлеровых сетках. [муйземнек]

При соударении тел из различных материалов характер и механизмы деформации ударника и преград различны. В настоящее время для описания этих процессов разработан и используется ряд различных математических моделей – ньютоновская модель удара, модель Герца, модель Релея и др.

Рассмотрим некоторые возможности программы LS-DYNA для решения задачи о соударении, на примере удара шара о плоскую поверхность. Для простоты расчета, примем, что падение шара происходит под действием силы тяжести. Конечно-элементная модель показана на рис. 1. Ударник и материал изготовлены из стали со следующими усредненными механическими характеристиками:

модуль Юнга $2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона 0.3, плотность 7850 кг/м^3 .

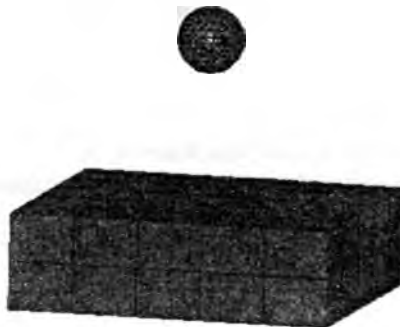


Рис. 1. Конечно-элементная модель

На первом этапе моделирования использовалась недеформируемая модель материала *MAT_RIGID. На рис. 2 а показан график изменения скорости шара при падении на плоскость и отскок от неё. Очевидно, что изменение скорости, полученное при моделировании удара, совпадает с изменением скорости при абсолютно упругом ударе, которому соответствует коэффициент восстановления $k=1$.

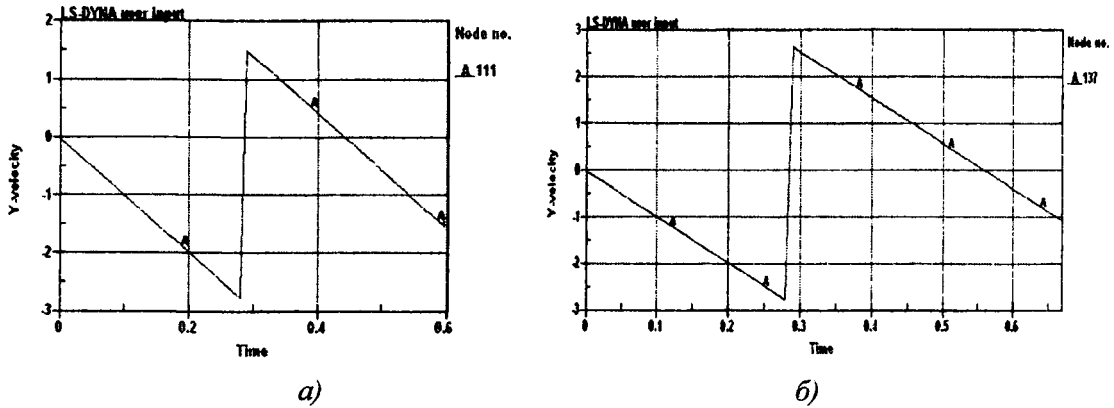


Рис. 2. Графики зависимости скорости шара от времени:
а – для упругого удара; б – для неупругого удара

Для моделирования в программе LS-DYNA не абсолютно упругого удара требуется использование пластической модели материала, например *MAT_PLASTIC_KINEMATIC.

Следующей решаемой задачей был неупругий удар стального шарика о стальную поверхность с учётом того, что использовался пластический материал со следующими параметрами:

- модуль Юнга $2 \cdot 10^{11}$ Па,
- коэффициент Пуассона 0.3,
- плотность 7850 кг/м^3 ,
- предел прочности $2 \cdot 10^9$ Па,
- предел текучести $2 \cdot 10^8$ Па.

Ниже на рис. 2(а) представлена зависимость скорости от времени для неупругого удара. Видно, что после удара скорость составляет 0.6 от первоначальной скорости, что совпадает с аналитическими расчетами. Также наблюдается потеря кинетической энергии (рис. 3):

Изменение кинетической энергии при ударе определяется как разность значений кинетической энергии в конце и начале удара:

$$T_2 - T_1 = \frac{m}{2} (V^2 - v^2) \quad (1)$$

Подставляя значения квадратов скоростей в разность значений кинетической энергии, получаем

$$T_2 - T_1 = -\frac{m}{2} (1 - k^2) v_n^2 \quad (2)$$

Таким образом, для стального шара радиусом 0.1 м, массой 32.8 кг потеря кинетической энергии составляла 30 Дж.

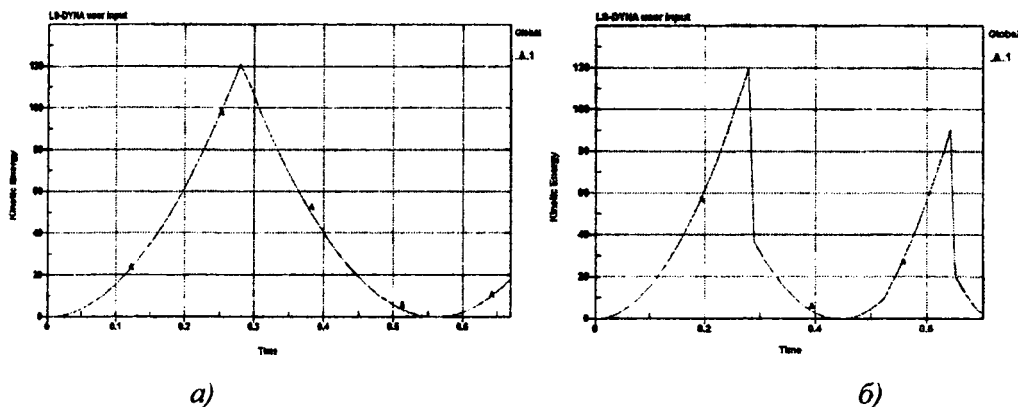


Рис. 3. График зависимости кинетической энергии шара от времени:
 а – для упругого удара; б – для неупругого удара

Одним из вариантов предыдущей задачи неупругого удара является задача внедрения индентора в сыпучую среду (грунт). Для описания поведения грунтов в LS-DYNA существует несколько моделей материалов, наиболее используемые из них: *MAT_GEOLOGIC_CAP_MODEL и *MAT_DRUCKER_PRAGER.

Особенностью моделирования грунтов являются большие деформации сдвига, величина которых превышает сотни процентов. Элементы грунта испытывают очень большие деформации, превышающие размер конечных элементов. Поэтому, если из решения не исключить эти чрезмерно деформируемые или разрушенные элементы, то поведение материала среды становится жестким, иногда говорят, что среда замыкается при сдвиге. Использование конечных элементов с одной точкой интегрирования, применение адаптивных сеток позволяют осуществить численное моделирование процесса деформации вплоть до потери устойчивости. Однако, чрезмерное искажение сетки, часто приводит к невозможности получения адекватного решения как при приближении деформационного процесса к предельной по устойчивости нагрузке, так и в запредельном состоянии.

В конечно-элементном пакете LS-DYNA реализовано несколько подходов к описанию движения сплошной среды. К ним относятся подходы Лагранжа, Эйлера и объединенный подход Лагранжа-Эйлера.

В подходе Лагранжа наблюдается движение материальных частиц сплошной среды. При использовании подхода Лагранжа к описанию движения сплошной среды для пространственной дискретизации чаще всего используется метод конечных элементов. При решении динамических задач метод конечных элементов используется с явной или неявной схемой интегрирования первого или второго порядка.

При использовании подхода Эйлера к описанию движения сплошной среды наблюдатель следит за точками пространства. Неизвестные, которыми, прежде всего, являются скорости движения среды, напряжения и деформации, связаны с точками пространства. Подход Эйлера получил существенно меньшее распространение для решения геотехнических задач, чем Лагранжа. Это обусловлено необходимостью использования дополнительных процедур для определения перемещений сплошной среды, в том числе ее границы, сложностью учета переноса внутренних переменных, которые характеризуют состояние материальных частиц грунта.

Подход Лагранжа-Эйлера, в иностранной литературе, он называется Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation (ALE), сочетает в себе оба подхода.

На основе подхода Лагранжа-Эйлера разработан ряд методов решения задач деформируемого твердого тела. Основными из них являются однокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера, многокомпонентный метод Эйлера и многокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера.

При решении задач однокомпонентным методом Лагранжа-Эйлера узлы конечно-элементной сетки могут перемещаться в пределах области, которую занимает материал, таким образом, чтобы уменьшить искажения сетки. В каждом конечном элементе содержится один материал.

При использовании многокомпонентного метода Эйлера материал течет через фиксированную в пространстве сетку. При этом каждый элемент может содержать смесь нескольких материалов.

Решения, основанные на методе Лагранжа-Эйлера, имеют преимущества методов Лагранжа и Эйлера при описании движения сплошной среды, не имея в то же время отмеченных выше недостатков.

При решении данной задачи использовался многокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера.

На рис. 4 показана конечно-элементная модель для расчета внедрения шарового индентора в грунт. Особенностью моделирования данной задачи является то, что для поверхности также требуется мелкая сетка.

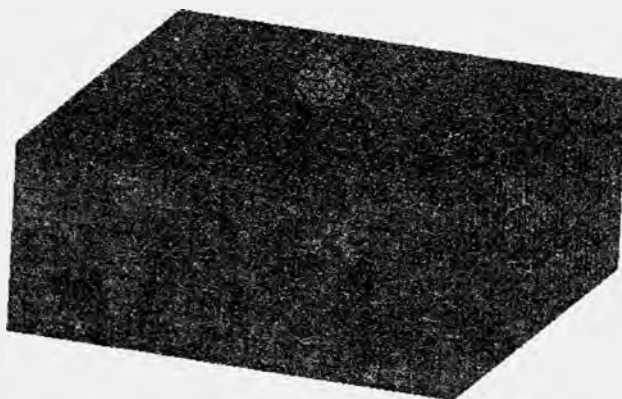


Рис. 4. Конечно-элементная модель

LS-DYNA user input
Time = 0.836
Contours of Y-displacement
min=-0.126386, at node# 421
max=0.00440531, at node# 361

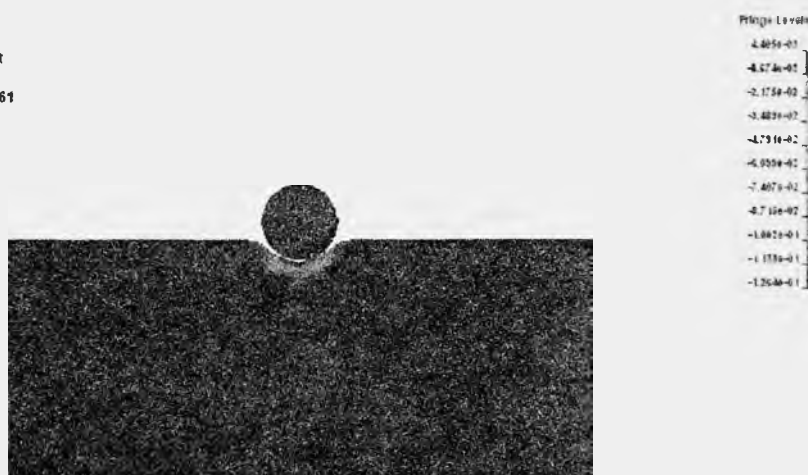


Рис. 5. Внедрение шара в грунт

Компьютерное моделирование в программе LS-DYNA позволяет оценить напряжённо-деформированное состояние как в инденторе, так и в полупространстве, в которое он внедряется (рис. 5).

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что решения, полученные на основе метода конечных элементов, с довольно высокой точностью совпадают с аналитическими решениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. Курс теоретической механики. – Санкт-Петербург: «Лань», 1998. – 732с. 2. М.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2005. – 106с.