

Исследование масштабируемости метода частиц при динамической балансировке нагрузки

Хайлун Тэн
Livermore Software Technology Corp.

Перевод В. Б. Литвинова под ред. Б. Г. Рубцова

Резюме

Мы представляем эффективный алгоритм балансировки нагрузки для методов частиц (метод «Взрыв частиц», Particle Blast method, далее PBM, и «метод Корпускулярных частиц», Corpuscular Particle method, далее CPM) в программе LS-DYNA®. Балансировка нагрузки достигается путем динамического адаптивного использования RCB для равномерно распределения нагрузки на процессоры. Численные тесты показали, что при использовании переформулированной параллельной схемы ускорение расчета задачи с воздушным взрывом может достигать около 20–30 раз или более при использовании 128–192 ядер; а при использовании метода CPM можно достичь ускорения в несколько раз при моделировании боковой (дверной) воздушной подушки.

Введение в метод «Взрыв частиц»

Метод «взрыв частиц» (particle blast method, PBM) [1][2] разработан для моделирования поведения газообразных продуктов детонации, обладающих высокой скоростью и температурой. Метод PBM разработан на основе корпускулярного метода (corpuscular method, CPM), который успешно применялся для моделирования развертывания воздушной подушки безопасности в случае медленного течения газа. Для моделирования взрыва, когда скорость течения газа чрезвычайно высока, допущение равновесия в CPM более не является действительным. За счет переформулирования алгоритма взаимодействия частиц, метод PBM способен моделировать взрывную нагрузку, которая является типичной неравновесной по теплу системой.

С тех пор как метод PBM был реализован в программе LS-DYNA в 2013 году, его точность была продемонстрирована в работах [3] и [4]. Благодаря своей простоте и устойчивости, этот метод подходит для решения задач со сложной геометрией и сложными границами. Лагранжева природа метода позволяет использовать недиффузионную адвекцию. Однако работа метода в параллельном режиме по-прежнему не вполне удовлетворительна. Метод PBM не масштабировался должным образом, когда общее число процессоров меньше примерно 20. Когда используется больше процессоров, достигается надлежащее ускорение.

В этой статье мы описываем разработанный нами динамические алгоритмы балансировки нагрузки для метода PBM. Эти алгоритмы нужны для обработки миллионов или десятков миллионов частиц, моделируемых в больших компьютерных системах с распределенной памятью. Основная идея состоит в том, что надо управлять разделением доменов таким образом, чтобы каждый процесс получал равную рабочую нагрузку во время прогона моделирования. В нашем методе используется методика разделения доменов «рекурсивное деление пополам по координатным направлениям» (Recursive Coordinate Bisection (RCB) domain decomposition), которая рекурсивно делит модель пополам по самому длинной стороне входной модели. При этом отслеживаются дисбалансы во времени исполнения между параллельными процессами. Балансировка нагрузки достигается за счет динамического адаптивного использования методики RCB для того, чтобы гарантировать, что каждый процесс имеет одинаковую нагрузку.

Численный пример 1: Моделирование воздушного взрыва

Описание эксперимента было нами взято из работы [5] и численно изучалось в работе [2]. В этом опыте зафиксированные квадратные пластины из стали AL-6XN толщиной 3,4 мм подвергались воздействию взрывной нагрузки сферического заряда из ВВ С-4 массой 150 г. Заряд располагался на дистанции 150 мм от пластины. В этой постановке эксперимента испытываемые пластины с площадью 613 мм² крепились по всему периметру при помощи прижимной пластины и болтов. Область, подвергавшаяся воздействию песка, имела площадь 406 × 406 мм. Область под пластиной была пустой и защищенной от действия взрыва, что позволяло пластине отклоняться

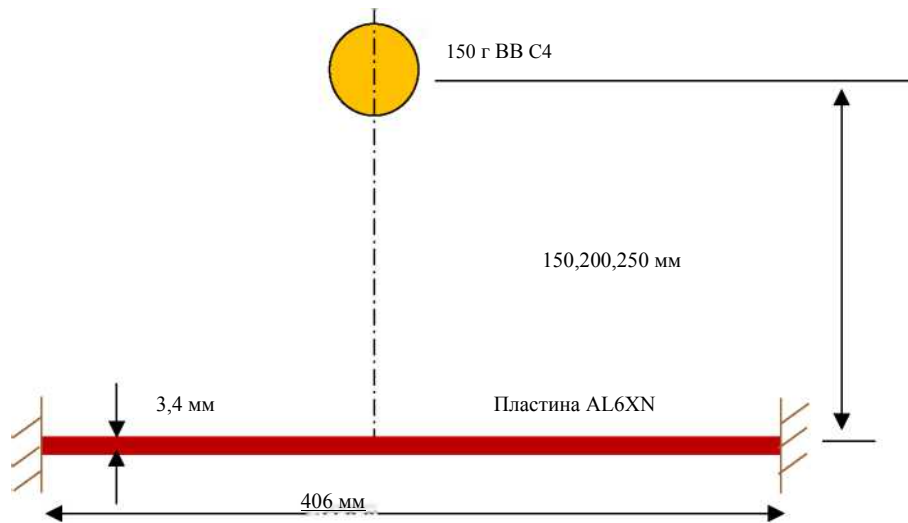


Рисунок 1. Схема постановки эксперимента

Сталь AL-6XN – довольно новая нержавеющая очень хорошая сталь с отличной устойчивостью к коррозии в хлоридных средах. Материал нержавеющей стали AL-6XN моделировался при помощи модифицированного определяющего уравнения Джонсона–Кука MAT_MODIFIED_JOHNSON_COOK. Параметры материала, использовавшиеся при моделировании взяты из работы [5] и приводятся в Таблице 1.

ρ (кг/м ³)	E (ГПа)	ν	χ	C_p (Дж/кгК)	α (K ⁻¹)	ϵ_0 (S ⁻¹)
8060	195	0,3	0.9	500	1.5E-5	1.E-3
A(МПа)	B(МПа)	N	C	m	Tr(K)	Tm(K)
410	1902	0,82	0,024	1,03	296	1700

Таблица 1. Свойства материала нержавеющей стали AL-6XN

Временное моделирование взрыва только заряда ВВ на Рисунке 1. Здесь использовались граничные условия в виде свободных границ таким образом, чтобы не присутствовали отражения от границ. Число частиц воздуха задавалось таким образом, чтобы масса воздушной частицы была равна массе частицы ВВ С-4. Моделирование проводилось с такими числами частиц ($N_{ВВ}; N_{воздух}$) = (2,000,000; 1,700,000). Сравнение между численными и экспериментальными результатами приводится в работе [2] и здесь обсуждаться не будет.

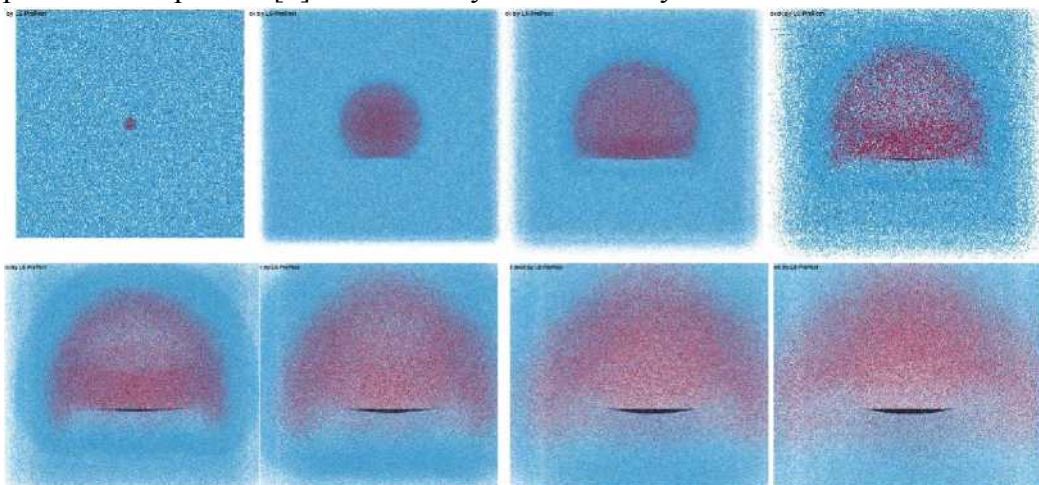


Рисунок 2. Моделирование развития процесса после детонации методом PBM (200000:1700000)

В Таблице 2 дается сравнение затрат процессорного времени между R122420 и сегодняшним подходом с динамической перебалансировкой (rebalancing, RB). Можно видеть, что для R122420 без перебалансировки, исполнение расчета для 12 процессов становится насыщенным: при увеличении числа процессов просто увеличивается время моделирования, время моделирования увеличивается с 7 ч до примерно 10 ч при использовании 192 процессоров. Нынешний подход позволяет масштабировать до примерно 200 процессоров. Более того, общее процессорное время сильно сокращается: при 12 процессах процессорное время сокращается с 7 ч до 1 ч 22 мин, то есть происходит более чем в 5 раз. Ускорение увеличивается, если процессов больше. В случае с 192 процессами мы получаем почти 30-кратное ускорение, и общее процессорное время сокращается с примерно 10 часов до примерно 20 минут.

Число процессоров	Общее процессорное время		
	SVN 122420	RB	Ускорение (раз)
12	25190 (7 ч 0 мин)	4916 (1 ч 22 мин)	5,12
24	24681 (6 ч 51 мин)	3188 (53 мин)	7,77
48	26540 (7 ч 22 мин)	2168 (36 мин)	12,24
96	30719 (8 ч 32 мин)	1482 (25 мин)	20,73
192	35627 (9 ч 54 мин)	1217 (20 мин)	29,27

Таблица 2. Общее процессорное время

Число процессоров	Время контакта частица–частица (с)		
	SVN 122420	RB	Ускорение (раз)
12	15506	2596	5,97
24	15809	1411,2	11,20
48	17183	739,7	23,23
96	19912	394,9	50,42
192	22468	239,1	93,97

Таблица 3. Время контакта частица–частица

Число процессоров	Время контакта частица–конструкция (с)		
	SVN 122420	RB	Ускорение (раз)
12	4982,6	1714,1	2,91
24	4742,3	1350,7	3,51
48	5118,1	1127,5	4,54
96	6585,0	849,2	7,75
192	8863,7	731,9	12,11

Таблица 4. Время контакта частица–конструкция

В Таблицах 3 и 4 приводится процессорное время для контактов частица–частица и частица–конструкция. Очевидно, что для контакта частица–частица можно добиться намного лучшей масштабируемости. При 192 процессорах достигнуто ускорение почти на 2 порядка по сравнению с R122420. Процессорное время, затрачиваемое на контакт частица–частица сократилось с более чем 6 часов (22468 с) до менее 4 минут (239,1 с). Ускорение для контакта частица–конструкция не такое хорошее, как для контакта частица–частица в силу того, что частица и конструкция разбиваются по отдельности, но все-таки мы получили примерно 12 раз для 192 процессоров.

Относительное ускорение по отношению к SVN 122420

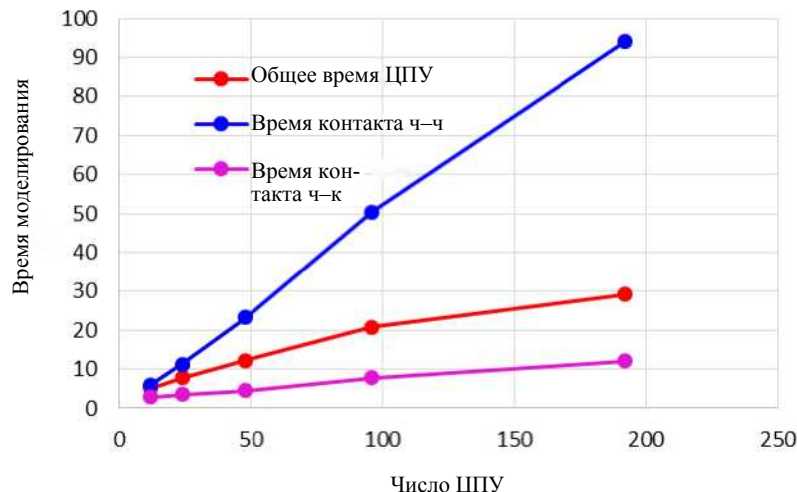


Рисунок 3. Относительное ускорение по сравнению с SVN 122420

Кривые относительного ускорения для общего процессорного времени, контактов частица–частица (ч–ч) и частица–конструкция (ч–к) представлены на Рисунке 3.

Численный пример 2: Испытание С-4 цилиндром

Испытание цилиндром [6] часто используется для получения уравнения состояния материала для ВВ. Испытание проводится так: берется трубка из бескислородной меди с высокой теплопроводностью (OFHC copper), заполненная ВВ с интересующими нас характеристиками. ВВ инициируется с одного конца и далее вдоль трубки идет детонационная волна. Движение стенок трубки отслеживается и радиальная скорость в различных местах используется для определения свойств ВВ. На рисунке 4 показано моделирование этой модели, где внутренний диаметр медной трубки равен 12,715 мм, толщина стенки – 2,593 мм и трубка на протяжении 300 мм наполнена 5,000,000 частиц ВВ С4.

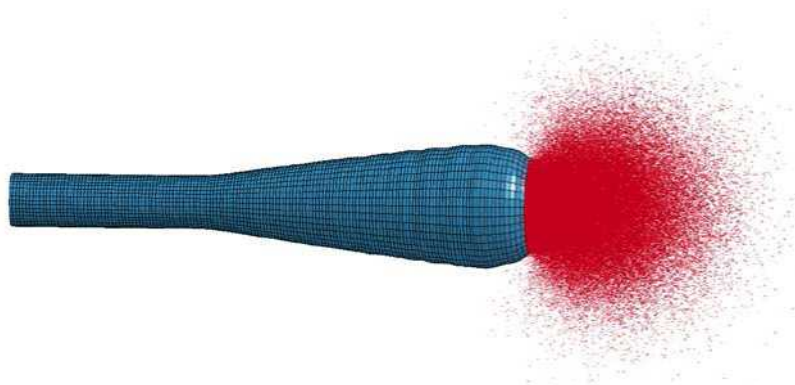


Рисунок 4. Моделирование испытания с цилиндром

В Таблице 5 приводится сравнение общего процессорного времени между просто методом R122420 и версией с перебалансировкой (RB). Можно заметить, что для метода R122420 без перебалансировки, при увеличении числа процессоров с 32 до 128 общее процессорное время остается практически неизменным. При нынешнем подходе мы получаем почти идеальное линейное масштабирование даже при увеличении числа процессоров до 128 processes. При использовании 128 процессоров мы получаем ускорение примерно в 22 раза. В Таблицах 6 и 7 приводится процессорное время для контактов частица–частица и частица–конструкция. В этом случае опять основное сокращение времени моделирования происходит за счет контакта частица–частица как мы видим в Таблицах 6 и 7. На Рисунке 5 приведены графики относительного

ускорения для общего процессорного времени и контактов частица–частица и частица–конструкция.

Число процессоров	Общее процессорное время		
	SVN 122420	RB	Ускорение (раз)
32	10098	1665	6,06
64	10058	862	11,67
128	9690	427	22,7

Таблица 5. Общее процессорное время

Число процессоров	Время контакта частица–частица (с)		
	SVN 122420	Dev (разрабатываемый)	Ускорение (раз)
32	8189	1204	6,80
64	8380	533,5	15,7
128	8067	225	35,9

Таблица 6. Время контакта частица–частица

Число процессоров	Время контакта частица–конструкция (с)		
	SVN 122420	Dev	Ускорение (раз)
32	1380	242,8	5,68
64	1197	164,7	7,3
128	1212	85,2	14,2

Таблица 7. Время контакта частица–конструкция

Относительное ускорение по отношению к SVN 122420

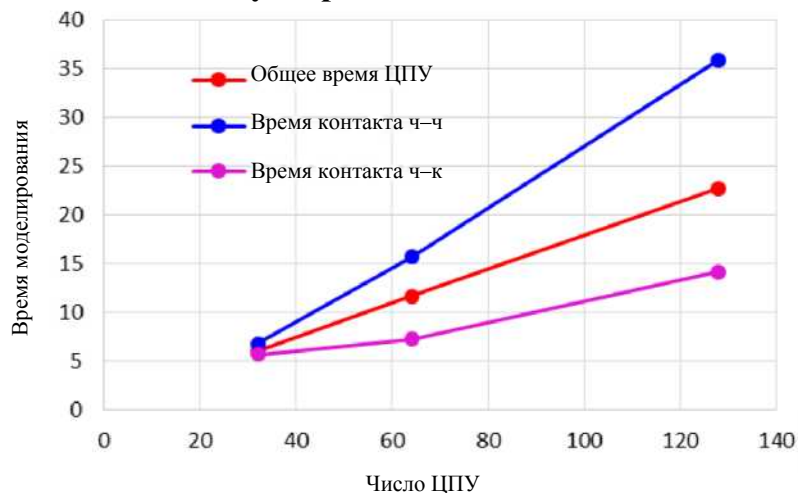


Рисунок 5. Относительное ускорение по сравнению с SVN 122420

Численный пример 3: наземный взрыв с цилиндрическим кумулятивным зарядом

Экспериментальные данные взяты из работы [7], в которой описаны взрывные эксперименты с ВВ, помещенным в стальной горшок. Постановка эксперимента проиллюстрирована на

Рисунке 10. Здесь наземная экспериментальная установка с габаритами 3×2 м и общей высотой 2,7 м включает подвешиваемый испытательный модуль. Испытательный модуль состоит из квадратной пластины-мишени из высококачественной стали Weldox 700E с габаритами $600 \times 600 \times 8$ мм, закрепленной по углам держателем. Длина внутренней диагонали держателя пластины составляет 627. Общий вес испытательного модуля – 2120 кг. ВВ – пластическое, марка m/46, состоящее из 86% ТЭНа и 14% дизельного масла, с плотностью 1500 кг/м^3 . Форма заряда – цилиндрическая с отношением диаметра к толщине равным 3, общий вес заряда – 0,75 кг. Более детальное описание эксперимента приводится в работе [7].

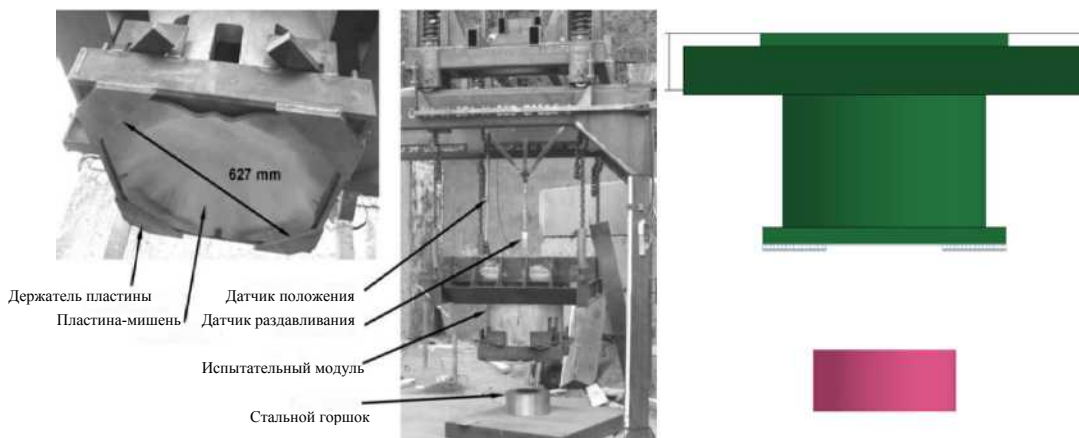


Рисунок 6. Экспериментальная установка наземного взрыва

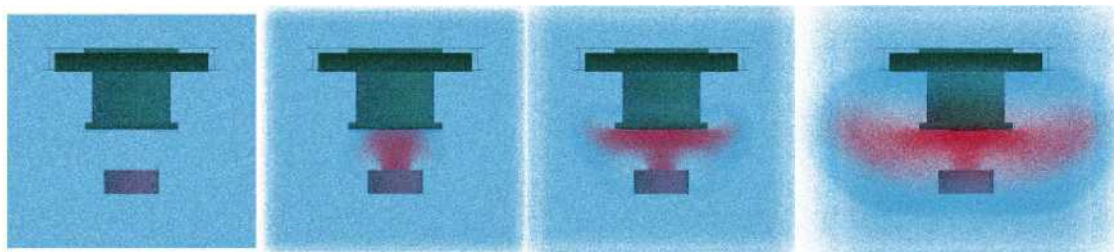


Рисунок 7. Моделирование методом PBM с (200000:1300000) после детонации

Моделирование проводилось с числом частиц ВВ и воздуха ($N_{\text{ВВ}}$; $N_{\text{воздух}}$) = (2,000,000; 1,300,000). Поперечное сечение моделирования одного заряда в различные моменты времени показано на Рисунке 7. В Таблице 8 приводится сравнение общего процессорного времени, времени контактов частица–частица и частица–конструкция для метода R122420 и для версии с перебалансировкой (RB). Метод R122420 снова достигает насыщения при 12 процессорах, общее процессорное время стабильно растет примерно до 16 часов при 96 процессорах, а затем резко увеличивается до более 21 часов при 192 процессорах. Текущий подход можно отмасштабировать до почти 200 процессов. Когда используется 192 процессов, достигается ускорение более чем в 31 раз общее процессорное время сокращается с примерно 21 часов до примерно 40 минут. Ускорение для контакта частица–частица становится огромным и достигает примерно 95 раз для 192 процессоров. Что касается контакта частица–конструкция то здесь мы также получаем хорошее относительное ускорение при 192 процессорах, около 27 раз. Относительное ускорение общего процессорного времени, контактов частица–частица и частица–конструкция проиллюстрировано на Рисунке 8.

Число процессоров	Общее процессорное время		
	SVN 122420	Dev	Ускорение (раз)
12	52549(14 ч 36 мин)	8431 (2 ч 20 мин)	6,2
24	51193(14 ч 13 мин)	5517(1 ч 32 мин)	9,28
48	56933 (15 ч 48 мин)	3596 (1 ч)	15,8
96	57281(15 ч 54 мин)	2825 (47 мин)	20,3
192	75810(21 ч 03 мин)	2414(40 мин)	31,4

Таблица 8. Общее процессорное время

Число процессоров	Время контакта частица–частица (с)		
	SVN 122420	Dev	Ускорение (раз)
12	29425	4173,4	7,1
24	29087	2453,3	11,86
48	34156	1321,5	25,8
96	34171	808,7	42,3
192	44812	473,8	94,6

Таблица 9. Время контакта частица–частица

Число процессоров	Время контакта частица–конструкция (с)		
	SVN 122420	Dev	Ускорение (раз)
12	11898	1351,5	8,80
24	12180	1077,6	11,30
48	13132	877,72	14,96
96	14531	803,19	18,09
192	21695	795,3	27,28

Таблица 10. Время контакта частица–конструкция

Относительное ускорение по отношению к SVN 122420

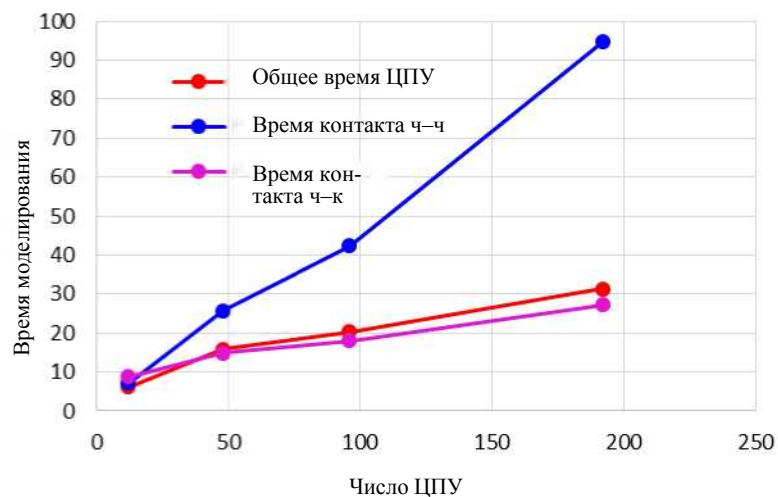


Рисунок 8. Относительное ускорение по сравнению с SVN 122420

Резюме

Мы представляем эффективный алгоритм балансировки нагрузки для методов частиц для метода «Взрыв частиц», PBM. За счет применения методики разделения доменов «рекурсивное деление пополам по координатным направлениям» можно минимизировать затраты на коммуникацию и равномерно распределить рабочую нагрузку. Несколько численных экспериментов показывают эффективность нашего подхода.

Литература

1. Teng Hailong, et. al ‘Particle Blast Method (PBM) for the Simulation of Blast Loading’, 13th International LS-DYNA Users Conference, 2014
2. Teng Hailong, ‘Coupling of Particle Blast Method (PBM) with Discrete Element Method for buried mine blast simulation’, 14th International LS-DYNA Users Conference, 2016
3. Genevieve Toussaint, Amal Bouamoul , ‘Close-Range Blast Effects on Small Square Clamped Plates Made from Aluminum 6061- T6’, Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2017
4. Len Schwer, Hailong Teng, Mhamed Souli, ‘LS-DYNA Air Blast Techniques: Comparisons with Experiments for Close-in Charges’, 10th European LS-DYNA Conference, 2015
5. T. Borvik, L. Olovsson, ‘A discrete particle approach to simulate the combined effect of blast and sand impact loading of steel plates’ Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011
6. Souers P.C, ‘Cylinder Test on C4’, UCRL-TR-230845, LLNL
7. Bjorn Zakrissona, et al, ‘Numerical Simulations of Blast Loads and Structural Deformation from Near-Field Explosions in Air’, International Journal of Impact Engineering, 2011.