НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НН ФІЗИКО–ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Монастирський Г. Є.
(підпис) (ініціали, прізвище)

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
(код і назва)

на тему: **Моделювання поширення детонаційної хвилі в конструкціях з циліндричною симетрією**

Виконав: студент 4 курсу, групи ФФ–03

Смоліков Михайло Олексійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, д.ф.-м.н. Монастирський Г. Є. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____ _____ _____
(номер розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент_____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)
(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент_____
(підпис)

Київ – 2024

Національний Технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НН Фізико Технічний Інститут
Кафедра прикладної фізики

Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський)
Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

«ЗАТВЕРДЖЕНО»
Завідувача кафедри
_____ __Монастирський.Г.Є.__
(підпис) (ініціали, прізвище)
« ____ » _____2024р.

ЗАВДАННЯ
на бакалаврську роботу студенту

Смоліков Михайлу Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Моделювання поширення детонаційної хвилі в конструкціях з циліндричною симетрією,
науковий керівник роботи: ____доцент, д.ф.-м.н. Монастирський Г. Є.___
підтверджені наказом по університету від «____»_____ 2024 р
2. Термін подачі студентом роботи «_____ »_____ 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: література до обраної теми, користувальницькі мануали по програмі AUTODYN, орієнтовні схеми геометрії модельованих структур з циліндричною симетрією
4. Зміст роботи: створення робочої математичної моделі заряду з циліндричною симетрією, її модифікація шляхом зміни геометрії, аналіз впливу зміни геометрії на фізичні характеристики.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): презентація, анімовані профілі тиску для різних геометрії.
6. Орієнтовний перелік публікацій: XXI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, Методика розрахунку термофізичних характеристик процесу поширення ударної хвилі в циліндричних об'єктах
7. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація — 13 аркушів А4
8. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання «____»_____20__ р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Опрацювання літератури за темою	4.11.23 - 29.12.23	виконано
2	Написання літературного огляду	01.12.23 - 25.01.24	виконано
3	Проведення моделювання	15.03.24-03.04.24	виконано
4	Написання другої частини дипломної роботи	01.05.24-15.05.24	виконано
5	Підготовка тез	08.04.24 - 14.05.24	виконано
6	Виступ на конференції	15.05.23	виконано
7	Написання третьої частини дипломної роботи	15.05.24-29.05.24	виконано
8	Написання висновків	04.06.24 - 06.06.23	виконано
9	Підготовка доповіді та презентації	08.06.24 - 13.06.24	виконано
10	Подання роботи на рецензування	13.06.24	виконано
11	Подання роботи до захисту	14.06.24	виконано

Студент _____ ___ Смоліков М.О.__
(підпис) (ініціали, прізвище)

Керівник роботи _____ Монастирський Г. Є.
(підпис) (ініціали, прізвище)

Реферат

Пояснювальна записка дипломної роботи за обсягом становить 50 сторінки тексту, містить 65 ілюстрацій та 11 формул. Для дослідження було використано 20 бібліографічне найменування.

Метою роботи було дослідити, користуючись програмним пакетом ANSYS AUTODYN, ефекти детонації та поширення детонаційної хвилі в спрощених моделях структур з різною геометрією із циліндричною симетрією.

Предметом дослідження є фізичні принципи, що лежать в основі явище детонації та поширення детонаційної ударної хвилі, їх математичне моделювання та фізичне обґрунтування.

Об’єкт дослідження є еволюція деяких фізичних характеристик детонаційної хвилі.

У ході дослідження було розглянуто декілька математичних моделей детонацій. Порівняно їх результати, обрано більш доцільну для подальшого моделювання.

Результати можна використовувати для подальших досліджень в сфері оборонної промисловості й для вдосконалення геометрії вибухових пристроїв.

Summary.

The explanatory note of the thesis is 50 pages of text, contains 65 illustrations and 11 formulas. For the study, 20 bibliographic references were used.

The purpose of the work was to investigate, using the ANSYS AUTODYN software package, the effects of detonation and detonation wave propagation in simplified models of structures with different geometries with cylindrical symmetry.

The subject of the study is the physical principles underlying the phenomenon of detonation and propagation of a detonation shock wave, their mathematical modeling and physical justification.

The object of the study is the evolution of some physical characteristics of the detonation wave.

In the course of the study, several mathematical models of detonations were considered. Their results were compared, and a more appropriate one was chosen for further modeling.

The results can be used for further research in the defense industry and to improve the geometry of explosive devices.

Зміст

Вступ 7
РОЗДІЛ 1 8
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД 8
1.1 Історична довідка 8
1.1.1 Загальні закони збереження 9
1.1.2 Хвиля детонації 10
1.2 Завдання для моделювання детонації 11
1.3 EOS: 12
1.3.1 Рівняння стану для ідеального газу 12
1.3.2 Рівняння стану для вибухівки JWL 13
1.3.3 Модель пластичності: Johnson-Cook Strength 14
1.3.4 Модель деформації: Johnson-Cook Failure 15
1.3.5 Параметр ерозії 15
РОЗДІЛ 2 17
НАЛАШТУВАННЯ МОДЕЛІ 17
РОЗДІЛ 3 21
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОБОГОВОРЕННЯ 21
3.1 Порівняння моделі $L/D = 1$ з товщиною стінок 1 та 3 мм 21
3.2 $L/D = 10$ пласкі основи 23
3.2.1 точка детонації рівновіддалена від основи та бічної поверхні 30
3.2.2 дві рівновіддалені точки детонації 33
3.3 $L/D = 10$ сферичні основи 38
3.4 $L/D = 10$ сферичні основи в об’єм 42
ВИСНОВКИ 47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 48

Вступ

Високошвидкісні та високоенергетичні процеси як детонація є складними для дослідження при проведені експериментів, однак, такі досліди дали змогу сформулювати залежності та формули які математично описують такий фізичний процес. Це в подальшому дає можливість досліджувати вибухи в комп'ютерних моделях, що значно безпечніше, не потребує складного обладнання для вимірювання.

На сьогодні питання ефективності вибухових пристроїв є достатньою для проведення досліджень, адже від ефективності залежить кількість застосованих зарядів, доцільність витрат стратегічних запасів вибухівки і запалів, зменшення часу ураження, що дає змогу виконати бойове завдання з меншою вірогідністю виявлення противником оператора БПЛА.

Тенденції що зберігалися протягом двох Світових воєн диктували створення гармат великих калібрів та багатотонних бомб для подолання гарно укріплених районів. В наш час тенденції набули зворотній характер, за рахунок розвитку систем наведення і безпілотної авіації можливість високоточного враження противника сильно виросли, що дало можливість зменшити сам заряд, збільшити дальність застосування, за звичай навіть збільшуючи завдану шкоду.

У відкритому доступі інформації що до моделювання процесу детонації досить мало, й основним предметом дослідження в них являє собою вплив ударних хвиль на опори будівель, металевих профілів, поширення хвиль у приміщеннях. В свою чергу метою дослідження в цій роботі є вплив ударної хвилі, спричиненої вибухом вибухової речовини в оболонках різної форми із циліндричною симетрією та характер руйнувань оболонки.

Задля досягнення мети було розроблено спрощену 2D модель заряду у вигляді осьового перерізу циліндричного заряду. Отримані результати можна застосовувати як початкові умови для подальших досліджень.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Історична довідка

Основні методи оптичного дослідження детонації, а саме фронту ударної хвилі були винайдені протягом 70-х 90-х роках 19 століття. Загалом винайшли три методи: метод Шлінера, тіньова графіка та інтерферометрія Маха-Цендера.[1]

Метод Шлінера дозволяє візуалізувати зміни в показнику заломлення в прозорих середовищах, що виникають через градієнти щільності. Вперше представлений в 1864 році німецьким фізиком Августом Топлером, який використовував його для вивчення звукових хвиль і теплових процесів. [1]

Метод тіньової графіки схожий на метод Шлінера, за виключенням того що фотографується тінь від області потоку як то шлейф гарячого повітря, що піднімається від багаття можна побачити через його тінь.

Метод Маха-Цендера (1891- 1892) базується на принципі інтерференції світлових хвиль. Він дозволяє точно вимірювати зміни показника заломлення в середовищі, що виникають через градієнти щільності. Використовується для високоточних вимірювань і досліджень хвильових процесів.

Однак перше повноцінне фото було створено фотографуванням на високочутливу желатинову плівку електричного розряду лейденської банки у 1884 році Ернстом Махом та Вентцелем.

В подальшому з розвитком методів оптичних досліджень було записано процеси вибуху на швидкісні камери які в свою чергу надали можливість спостерігати процеси детонації в динаміці за малі проміжки часу, їх протікання в різних об’ємах та середовищах, ефекти під час взаємодії зі твердими структурами.[1]

Важливим для розуміння фізики детонації є праця Зельдовича та Райзера "Фізика ударних хвиль та високотемпературних гідродинамічних явищ" (2002). Важливим аспектом цієї роботи є її міждисциплінарний підхід, що поєднує теоретичні моделі з експериментальними даними, що дозволяє краще зрозуміти складні фізичні явища, пов'язані з ударними хвилями та високотемпературною гідродинамікою.

Чисельним моделюванням детонації з використанням можливостей новітніх електронно обчислюваних машин (ЕОМ) та методів скінченних об'ємів і скінченних елементів, розробки й застосування адаптивних сіткових методів, які дозволили ефективніше моделювати складні детонаційні процеси в результаті дали змогу створити програмне забезпечення для дослідження, такі як AUTODYN Ansys та LS-Dyna.

1.1.1 Загальні закони збереження

Керуючі рівняння, що моделюють процес детонації це закони збереження

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho div(\vec{u}) + (\vec{u} - \vec{w}).grad(\vec{\rho}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \overline{\overline{grad}}(\vec{u})\rho(\vec{u} - \vec{w}) = div(\bar{\bar{\sigma}}) + \vec{b} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho(\vec{u} - \vec{w}).grad(E) = \bar{\bar{\sigma}}.\overline{\overline{grad}}(\vec{u}) + \vec{b}.\vec{u} \quad (3)$$

де рівняння (1) – (3) збереження маси, імпульсу, енергії відповідно, a b, ρ, u, w, σ і E об’ємні сили тілі, густина, швидкість частинок, швидкість сітки, напруження та питома внутрішня енергія, відповідно. (У цих рівняннях «.» позначає скалярний добуток; градієнт [grad] векторного поля є тензорним полем; дивергенція [div] тензорного поля є векторним полем; а подвійна вертикальна риска означає тензор).[2]

1.1.2 Хвиля детонації

Ідеалізований профіль хвилі детонації показано на рис. 5. За стрибком тиску на фронті хвилі детонації слідує хвиля спадного тиску або хвіст Тейлора, який в своєму мінімумі є хвилею розрідження. В розрахунках приймають, що ширина зони горіння де відбувається хімічна реакція з піком тиску (пік фон Неймана), дорівнює нулю. Тобто фактично піком Неймана нехтують, хоча експериментально встановлена ширина піку порядку одного міліметра [18]. Розрахунок стрибків тиску, швидкості та густини на фронті ударної хвилі призводить до рівнянь, відомих як рівняння стрибка Ренкіна-Гюгоніо, які базуються на збереженні маси, імпульсу та енергії.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{U}{U-u}$$

де U – швидкість поширення детонації, u – швидкість частинок середовища.

$$p - p_0 = \rho U u$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2} u^2 \left[\frac{p + p_0}{p - p_0}\right]$$

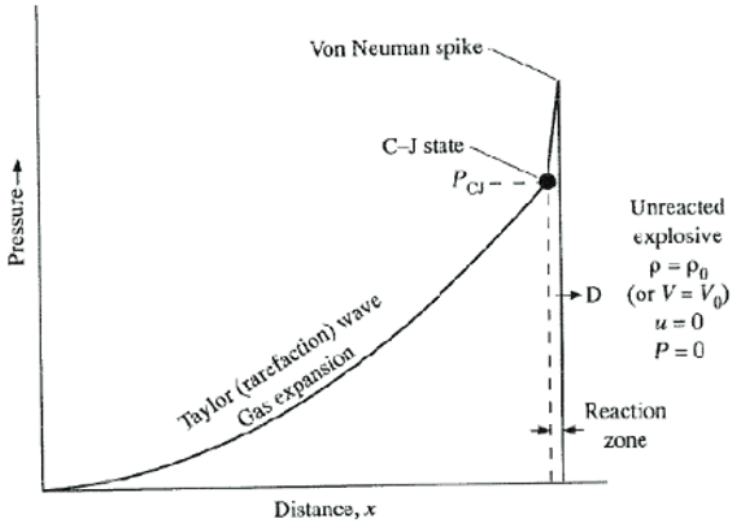


Рис.5 Крива «тиск-відстань», що показує профіль детонаційної хвилі[19]

1.2 Завдання для моделювання детонації

Пряме моделювання процесу детонації передбачає створення фізичної моделі кінцевих елементі (FE) модельованого середовища. Перше завдання а полягає у створенні сіток кінцевих елементів. FE модель складається з сітки Лагранжа для твердих тіл і сітки Ейлера для газів або рідин. Довільна лагранжево-ейлеріанська формула (ALE), яка поєднує як лагранжеву, так і ейлерову техніку, також може бути використане для моделювання детонації.[2] Друге завдання полягає в тому, щоб задати властивості матеріалів, що моделюються, та початкові умови, визначивши початкову енергію, масу вибухової речовини, а також початкову температуру і тиск навколишнього середовища. В процесі моделювання використовується залежність між тиском p, питомою внутрішньою енергією E і густиною ρ, тобто рівняння стану (EOS), для всіх матеріалів і середовищ в задачі. Використовуючи цю інформацію (EOS, властивості матеріалу, початкові та граничні умови) і закони збереження маси, імпульсу та енергії, програма розв’язує диференціальні рівняння, що визначають динаміку задачі.[2]

Оскільки, чисельне моделювання детонації включає як гідродинаміку (поширення ударної хвилі в повітрі), так і явну динаміку (взаємодія зі оболонкою ударної хвилі та її реакція) було обрано для оболонки саме сітку ALE. На відміну від звичайної сітки Лагранжа, в якій матеріал не рухається в комірках, в сітці ALE краще спостерігається вплив ударної хвилі на фізичні параметри за рахунок ущільнення в межах комірок матеріалу.

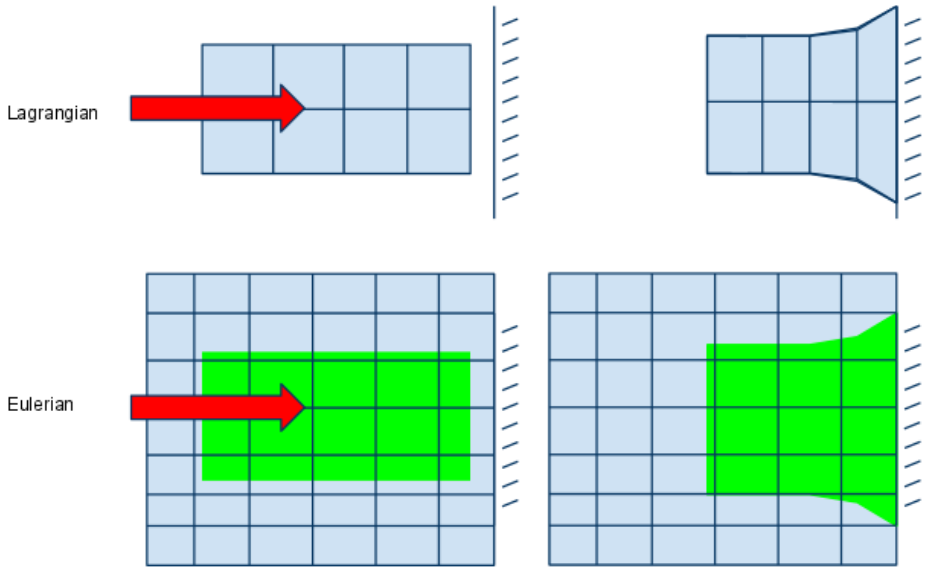


Рис.1 Різниця між Ейлеровою та Лагранжеовою сіткою під час деформації [3]

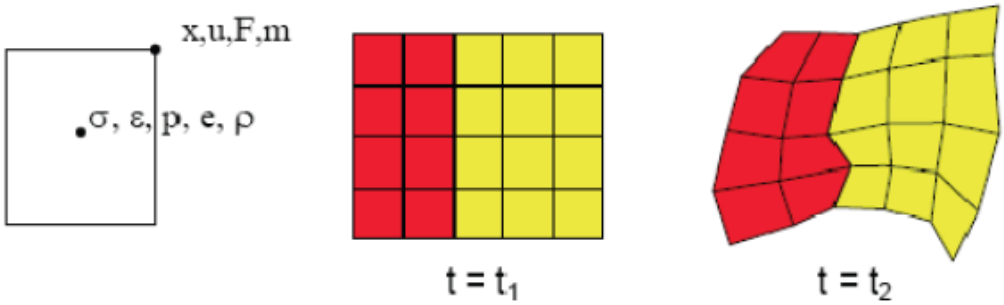


Рис.2 Оптимальне сіткове районування з використанням ALE [4]

Отже, визначившись з можливостями різних сіткових методів слід розглянути низку рівнянь для опису поведінки матеріалів від час вибуху

1.3 EOS:

1.3.1 Рівняння стану для ідеального газу

Хімічні вибухи зазвичай нагрівають навколишнє повітря до температур (порядку 3000 K°), і тому дисоціація молекул O_2 і N_2 в повітрі не відбувається. Тому в чисельному аналізі прийнято вважати повітря, що оточує хімічний вибух, ідеальним газом з постійною адіабатичною сталою γ, і набуває вигляду: [5]

$$p = (\gamma - 1)\frac{\rho}{\rho_0}E \text{ [6]}$$

1.3.2 Рівняння стану для вибухівки JWL

Для бризантних вибухових речовин було розроблено низку емпіричних EOS, включаючи BKW (Беккер-Кістяковський-Вілсон) [7], JCZ (Джейкобс-Каупертвейт-Цвіслер) [8], LJD (Леннард-Джонс-Девоншир) [9] і JWL (Джонс-Вілкін-Лі) [10]. Використання кожної з цих моделей обмежується діапазоном експериментальних даних, на основі яких вона була побудована. З наведених вище EOS найпопулярнішою є JWL, тому далі будемо розглядати саме вибухівку описану цим рівнянням стану. «Випробування циліндром», розроблене в Ліверморській лабораторії, застосовується для визначення характеристики адіабатичного розширення продуктів детонації шляхом вимірювання руху стінки циліндра під дією продуктів детонації вибухової речовини, що розміщується в об'ємі циліндра. Це випробування зазвичай дозволяє отримати криву залежності радіуса розширення від часу, яку можна пов'язати з відносним об'ємом розширення і густиною енергії. Функція енергії розширення об'єму, отримана під час випробування, часто використовується для виведення рівняння стану продуктів детонації, з яких найбільш поширеним є рівняння Джонса-Вілкінса-Лі. [11]

$$p = A\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right)e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\rho E$$

де ρ_0 – еталонна густина, ρ – густина, $\eta = \rho/\rho_0$.

Значення констант A, B, R_1, R_2 і ω для багатьох звичайних вибухових речовин були визначені з експериментів. [12]

Внесок кожного з параметрів на профіль загального тиску зображений на рисунку 3.

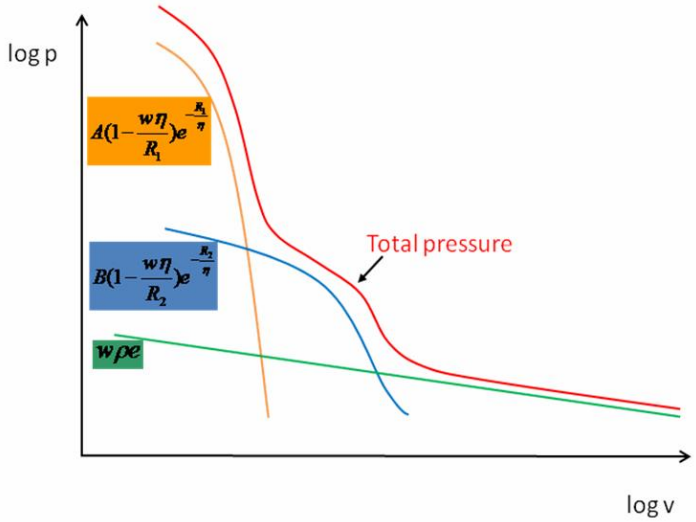


Рис.3 Залежність тиску від густини для рівняння стану JWL [13]

1.3.3 Модель пластичності: Johnson-Cook Strength

Модель пластичності матеріалу Джонсона-Кука використовують для симуляцій в яких, зазвичай метали, зазнають великих деформацій за високої температури та швидкості удару. У цій моделі межа текучості змінюється залежно від деформації, її швидкості та температури. [14]

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n][1 + Cln\varepsilon_p^*][1 - T_H^m]$$

де $\varepsilon_p -$ еквівалентна пластична деформація, $\varepsilon_p^* -$ нормалізована швидкість деформації, $T_H -$ гомологічна температура яка визначається $\frac{T-T_{room}}{T_{melt}-T_{room}}$, а параметри A, B, C, n та m є матеріальними константами, які визначаються експериментально. [14]

Перший множник характеризує зміну межі текучості за тиском, другий від швидкості деформації, третій від температури.

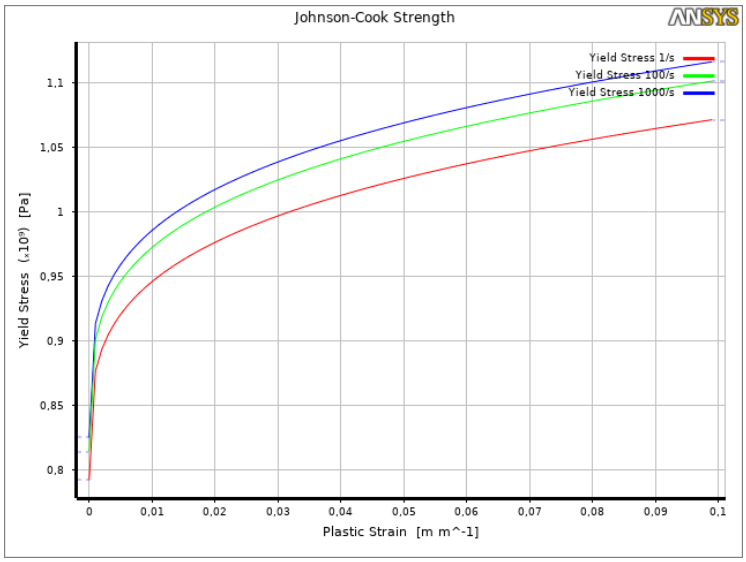


Рис.4 Графік побудовано в програмному пакеті ANSYS Engineering Data

1.3.4 Модель деформації: Johnson-Cook Failure

Побудована на основі моделі пластичності й дозволяє проводити симуляцію руйнування матеріалу під час високошвидкісних ударів, вибухів та інших екстремальних умовах. Ця модель допомагає прогнозувати розповсюдження тріщин і фрагментацію матеріалу. Функція тиску, швидкості деформації та температури: [15]

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f}$$

$$\varepsilon^f = [\mathrm{D}_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}][1 + D_4 \ln|\dot{\varepsilon}^*|][1 + D_5 T^*]$$

Де $\sigma^* -$ відносне середнє напруження, $\dot{\varepsilon}^* -$ відносна швидкість деформації, $T^* -$ відносна температура [15]

Так само як і для моделі пластичності множники характеризують зміну від швидкості деформації, третій від температури.

1.3.5 Параметр ерозії

Ерозія - це числовий механізм для автоматичного видалення елементів під час симуляції. Основною причиною використання ерозії є видалення дуже спотворених елементів з симуляції до того, як вони стануть інвертованими (виродженими). Це гарантує, що часовий крок залишається на розумному рівні і рішення можуть продовжуватися до бажаного часу завершення. Ерозія також може бути використана для моделювання руйнування матеріалу за рахунок збереження інерції видаленої комірки і розподіл її між сусідніми, не еродованими. [16]

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2}{3}[|(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2) - (\varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xx}) + 3(\varepsilon_{xy}^2 + + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)|]^{\frac{1}{2}}$$

Де ε_{**} тензори деформації. Коли ε_{eff} досягає встановленого оператором значень відбувається ерозія комірки. Це значення рекомендовано встановити 1.5 [17]

Усі наведені вище рівняння стану, деформації, руйнування та ерозії були обрані через їх доступність та відомі для обрахунку значення й підходять для подальшого налаштування математичної моделі вибуху в 2D представлені осьового перерізу циліндричної симетрії заряду. Спостереження за профілями тиску та швидкості проводилося в опорних точках на моделі і в системі.

Як результат поглибленого аналізу літературних джерел була сформульована задача дослідження, в якій необхідно, користуючись програмним пакетом ANSYS AUTODYN, дослідити ефекти детонації та поширення детонаційної хвилі в спрощених моделях структур з різною геометрією із циліндричною симетрією, вивчити характер розльоту уламків, їх формування, і швидкості розльоту.

РОЗДІЛ 2

НАЛАШТУВАННЯ МОДЕЛІ

Геометрія моделі представлена осьовим перерізом циліндричного заряду різної геометрії вершин та основ з відношенням довжини до діаметру $L/D = 1$ та $L/D = 10$ з товщинами стінок 3 мм та 1 мм.

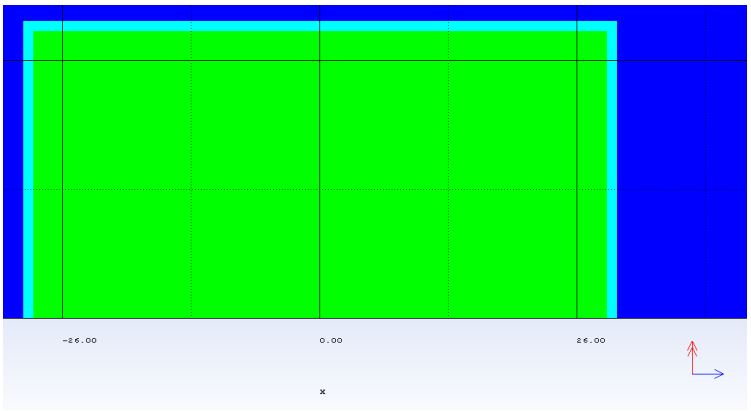


Рис.5 Параметри геометрії моделі $L/D = 1$ товщина стінок 1 мм

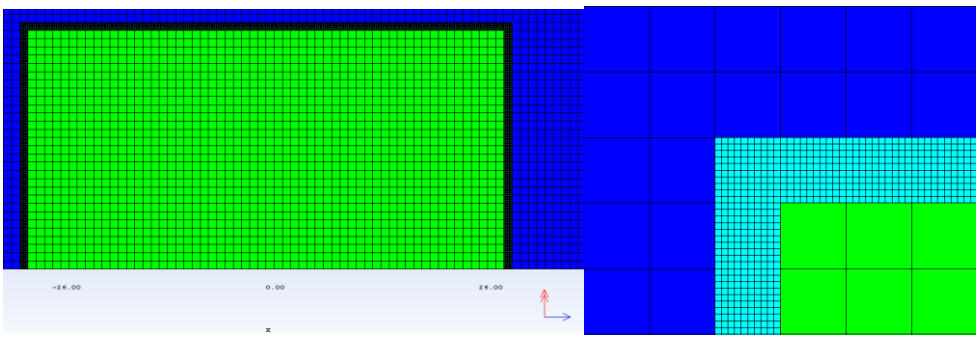


Рис.6 Параметри мешу моделі $L/D = 1$ товщина стінок 1 мм

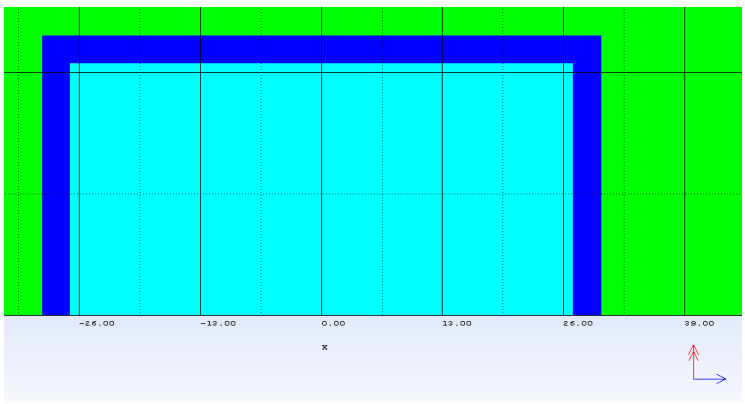


Рис.7 Параметри геометрії моделі $L/D = 1$ товщина стінок 3 мм

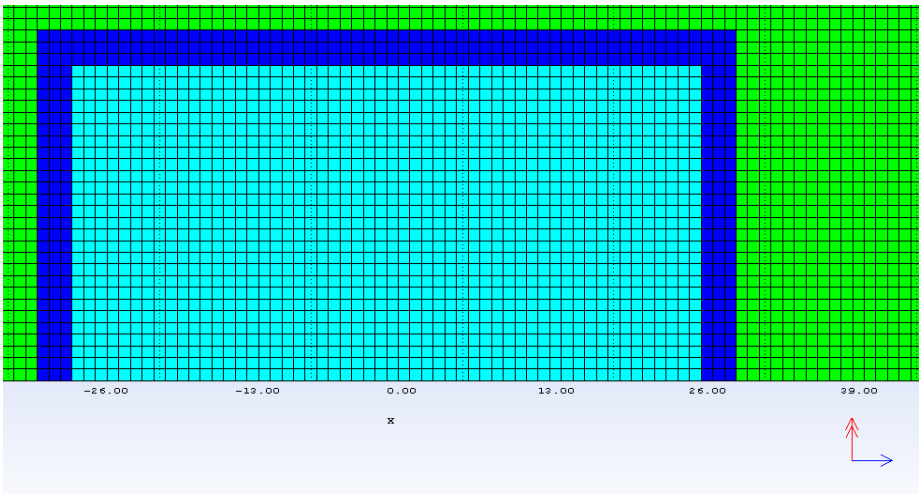


Рис.8 Параметри мешу моделі $L/D = 1$ товщина стінок 3 мм

На геометрії для дослідження були розміщені опорні точки для вимірювання фізичних параметрів. Червоні точки належать сітці Ейлера і є нерухомими в просторі, сині точки належать сітці ALE, є рухомими й прив'язаними до геометрії оболонки. Для кожного виду геометрії вони будуть представлені графічно з поясненням.

Початкові умови: тиск – атмосферний (101,3 kPa), температура – 300 K°

Граничні умови: нижня стінка області обрахунку (сітка Ейлера) є жорсткою (тобто така що не пропускає матеріал і відображає всі процеси), що забезпечує вісесиметричність обрахунків. Бічні та верхня стінка: відкриті (тобто такі що пропускають матеріал, не відображаючи процеси).

Параметри мешу: для повітря і вибухової речовини застосований метод сітки Ейлера, для оболонки змішану сітку лагранжа-ейлера (ALE).

В якості навколишнього середовища було обрано атмосферне повітря, яке в дослідженні набуває властивостей ідеального газу, параметри якого зазначені в таблиці 1

Таб.1 Параметри рівняння стану для ідеального газу

Adiabatic constant	1.4	-
Pressure shift	0	-
Reference Temperature	288.200012	K
Specific Heat	717.599976	$J/kg \cdot K$
Thermal Conductivity	0	J/mKs

Вибуховою речовиною було вирішено обрати C4, оскільки параметри що описують рівняння стану для цієї вибухівки відомі, і багато разів перевірені експериментами

Таб.2 Параметри для рівняння стану для вибухівки JWL

Reference Density	1.601	g/cm^3
Parameter A	6.097700e+08	kPa
Parameter B	1.295000e+07	kPa
Parameter R1	4.5	-
Parameter R2	1.4	-
Parameter W	0.25	-
C-J Detonation velocity	8.193001e+03	m/s
C-J Energy / unit volume	9.000001e+06	kJ/m^3
C-J Pressure	2.800000e+07	kPa

Таб.3 Параметри для моделі пластичності: STEEL 4340 Johnson-Cook Strength

Shear Modulus	7.700002e+07	kPa
Yield Stress (A)	7.920002e+05	kPa
Hardening Constant (B)	5.100001e+05	kPa
Hardening Exponent (n)	0.26	-
Strain Rate Constant (C)	0.014	-
Thermal Softening Exponent (m)	1.03	-
Melting Temperature	1.793e+03	$K°$
Ref. Strain Rate (/s)	1	-

Таб.4 Параметри для моделі деформації: STEEL 4340 Johnson-Cook Failure

Damage Constant, D_1	0.05	-
Damage Constant, D_2	3.44	-
Damage Constant, D_3	-2.12	-
Damage Constant, D_4	0.002	-
Damage Constant, D_5	0.61	-
Melting Temperature	1.793e+03	$K°$
Ref. Strain Rate (/s)	1	-

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОБОГОВОРЕННЯ

3.1 Порівняння моделі $L/D = 1$ з товщиною стінок 1 та 3 мм

Визначившись з налаштуваннями моделі залишається тільки задати точку (або точки) детонації. В результаті обрахунків моделі маємо профілі тиску та швидкості оболонки.

Для моделі $L/D = 1$ товщина стінок 3 мм маємо такі профілі

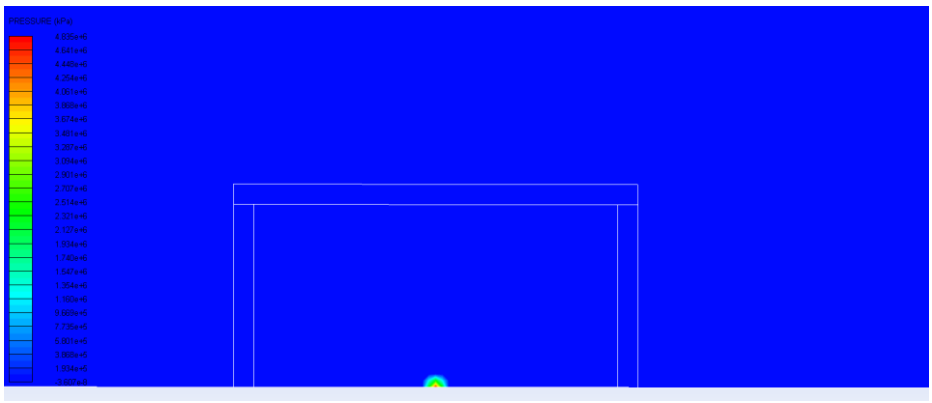


Рис.9 Початковий етап детонації

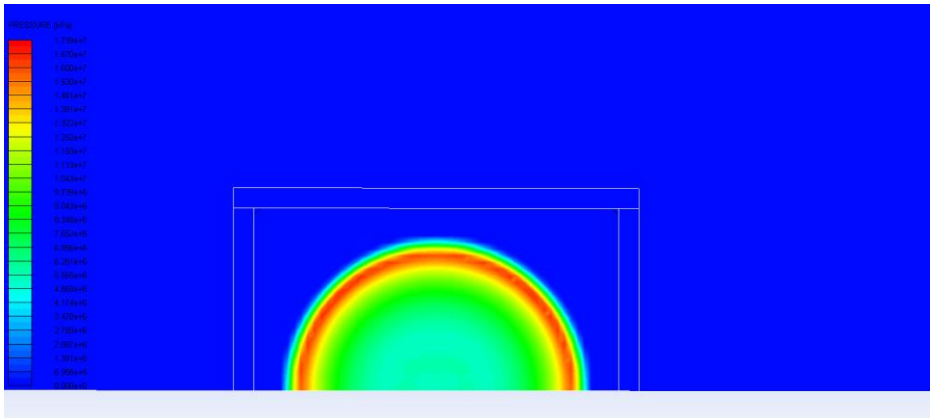


Рис.10 Момент поширення ударної хвилі перед досягненням оболонки

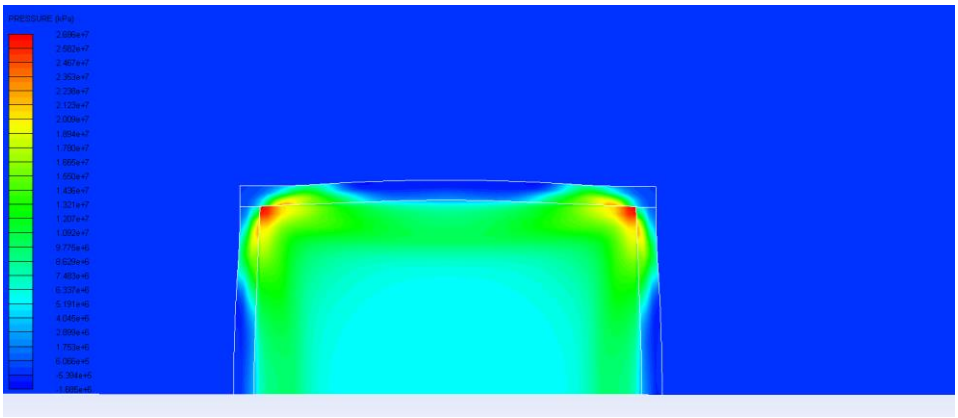


Рис.11 Момент досягнення оболонки і концентрації в кутах геометрії

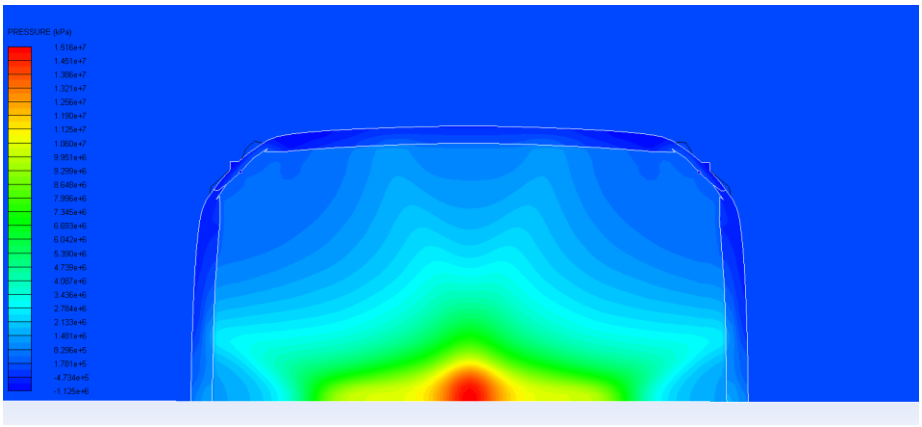


Рис.12 Відбита хвиля повернулася в точку детонації

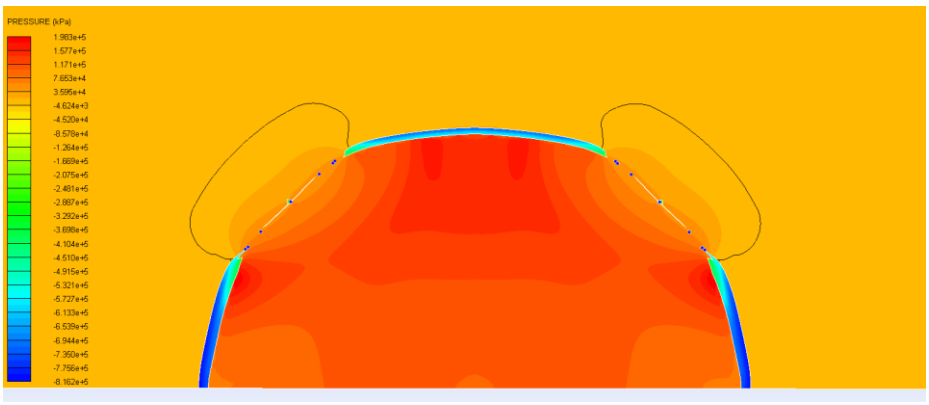


Рис.13 Момент розриву і утворення ерозійних комірок

Для моделі $L/D = 1$ товщина стінок 1 мм маємо такі профілі

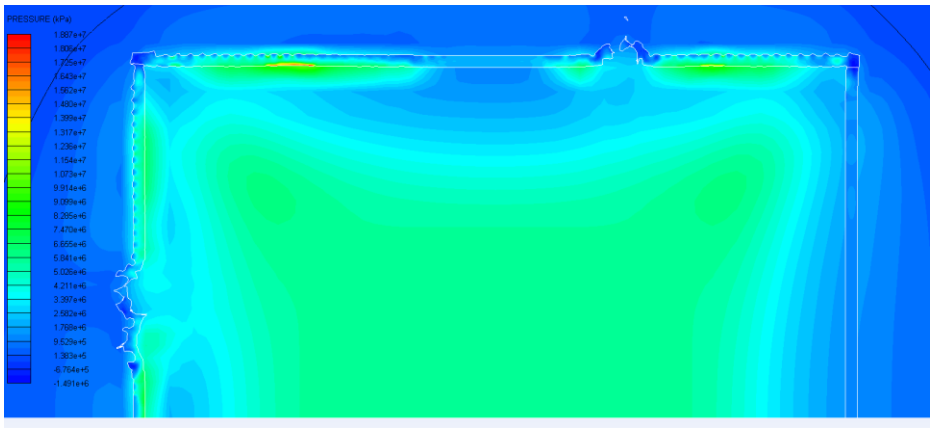


Рис.14 Момент досягнення ударної хвилі оболонки і протікання

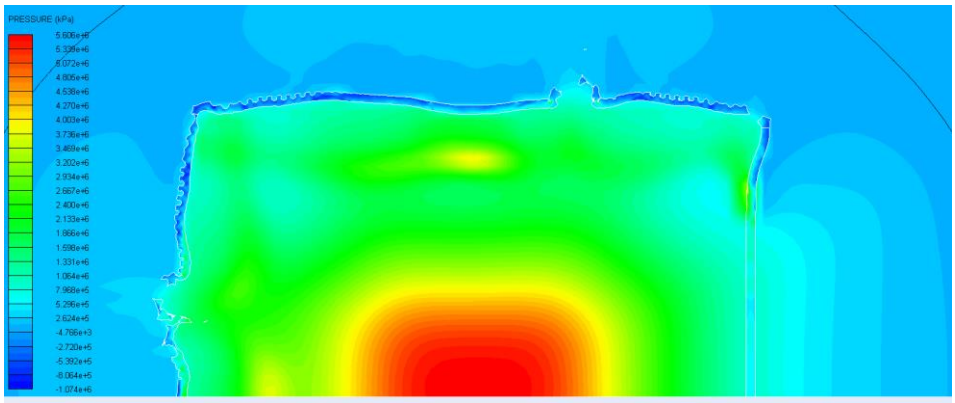


Рис.15 Відбита хвиля повернулася в точку детонації

Аналізуючи надані профілі тиску приходимо до висновку що в подальшому є доцільним ущільнювати сітку відношення 1/5 для збереження адекватного часового кроку й для нормального спостереження протікання фізичних процесів в оболонці. Також відношення $L/D = 1$ в подальшому розгляді не є доцільним та наочним через наближення до форми до сферичного заряду. Отже, далі будемо розглядати моделі з відношенням $L/D = 10$.

3.2 $L/D = 10$ пласкі основи

Профілі тиску на етапі протікання ударної хвилі по об’єму, досягнення основ оболонки, відбиття від основ, повне руйнування оболонки.

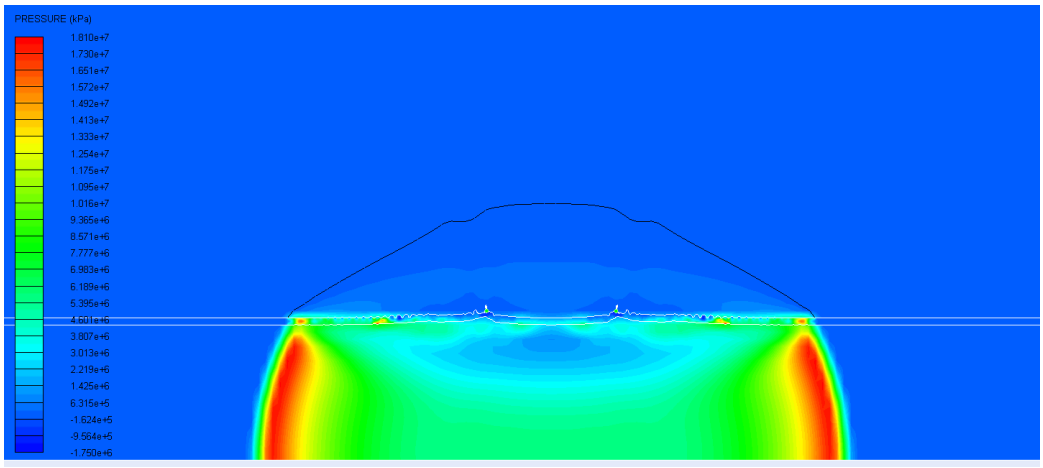


Рис.16 Профіль тиску на етапі протікання ударної хвилі по об’єму

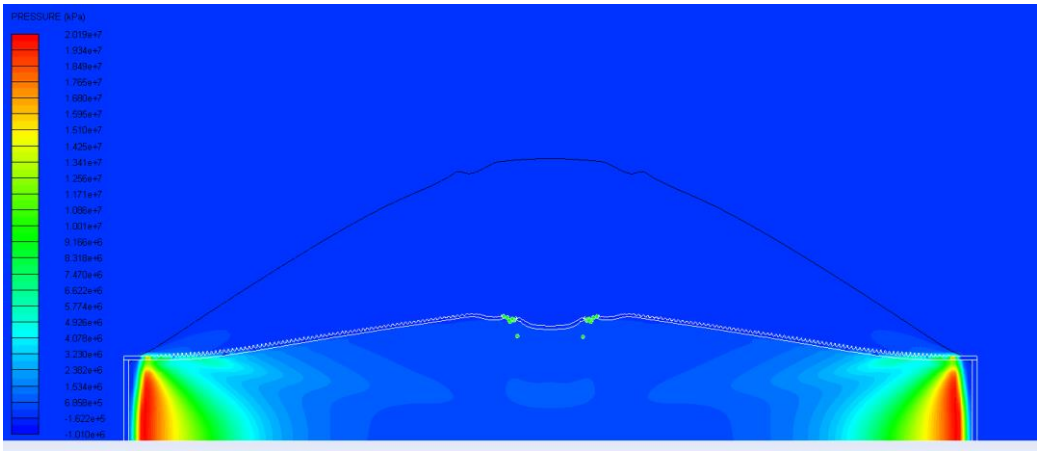


Рис.17 Профіль тиску на етапі досягнення основ оболонки

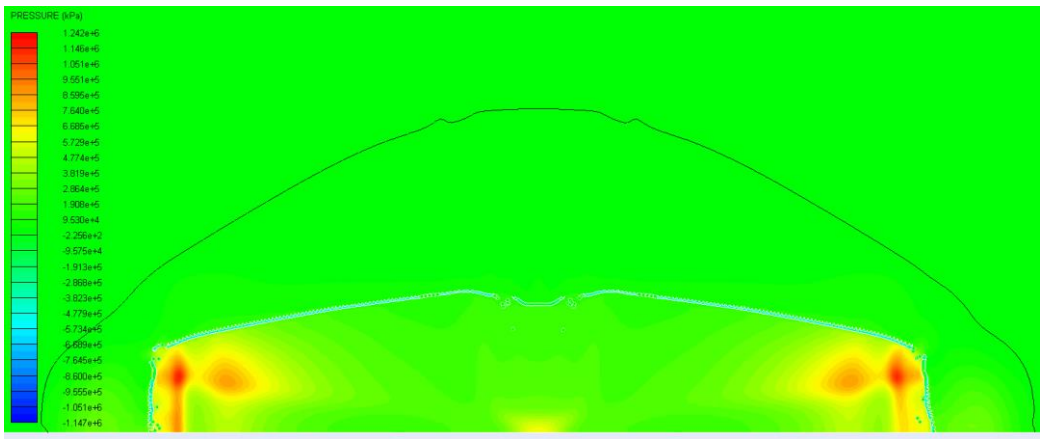


Рис.18 Профіль тиску на етапі відбиття від основ

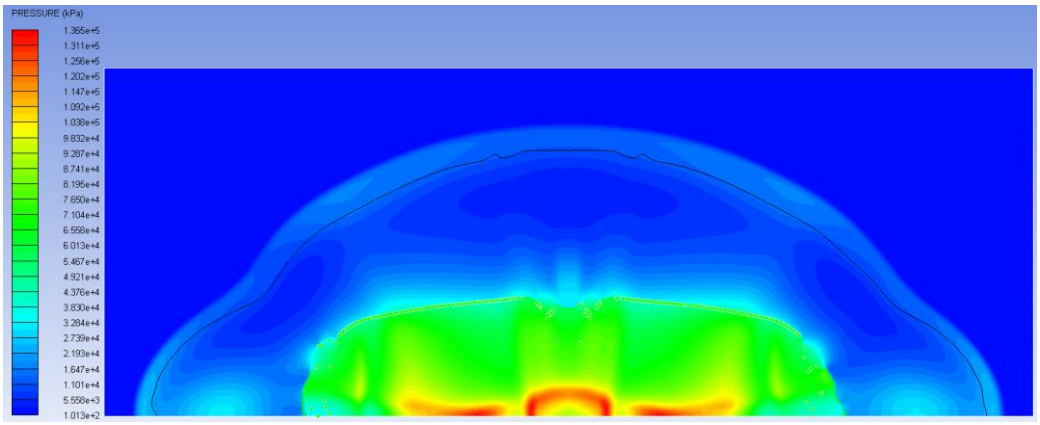


Рис.19 Профіль тиску на етапі повного руйнування оболонки.

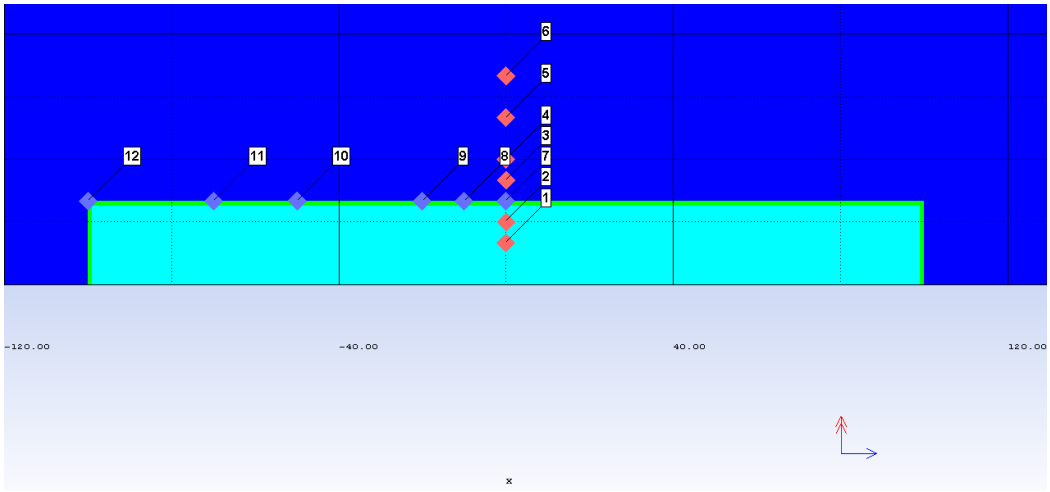


Рис.20 Геометричне представлення опорних точок для вимірювання

Розглянемо графіки для червоних точок.

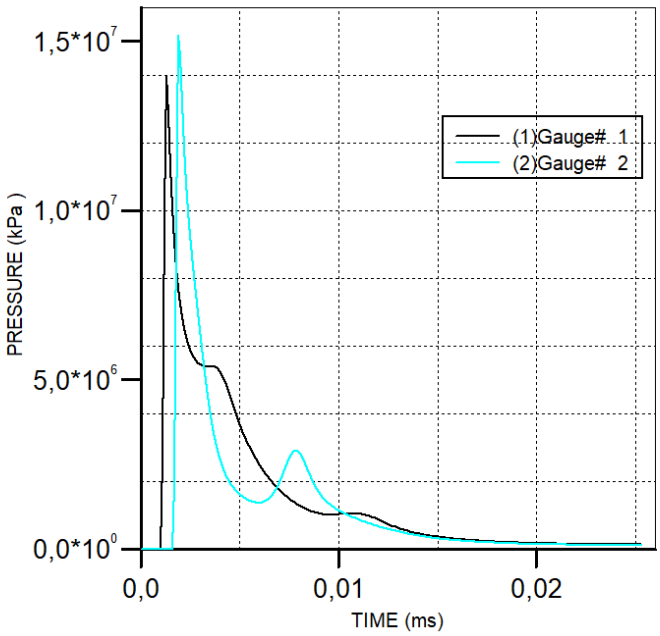


Рис.21 Графік залежності тиску від часу для точок 1,2

Перші дві точки знаходяться безпосередньо в об’ємі вибухівки, отже ми можемо спостерігати процеси що відбувалися безпосередньо під час проходження детонації. З графіку видно що пікові значення другої точки більші, що свідчить про дійсне проходження ударної хвилі з подальшою ініціацією вибухової речовини. Після пікових значень бачимо характерні спади, які відповідають хвилі розрідження, що йде за фронтом детонації. Другий пік пов’язаний з поверненням відбитого від оболонки фронту ударної хвилі.

Для точок 3,4,5 вже не характерне різкий пік (фон Неймана) і зумовлений частковим пропусканням через оболонки енергії ударної хвилі. Осциляційний стрибок в області падіння повзаний з досягненням елементів сітки оболонки в точки на ейлеревій сітці і проходження через неї (рис. 23-25). Другий пік характеризує тиск що діє на елементи оболонки.

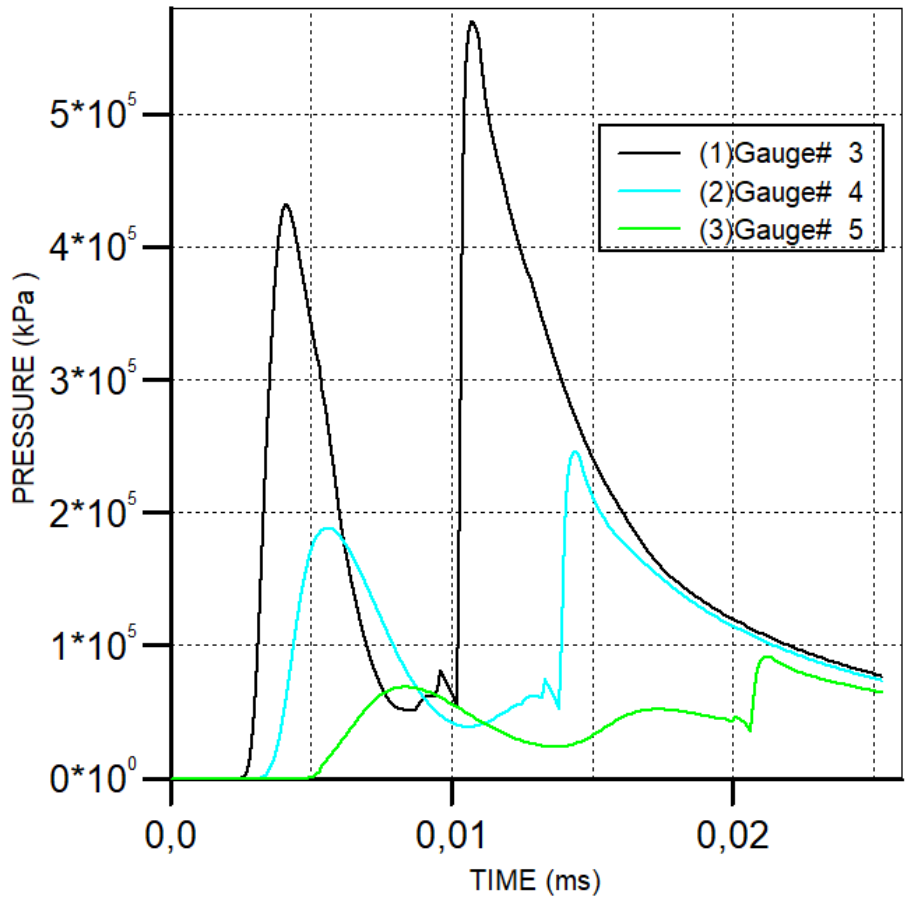


Рис.22 Графік залежності тиску від часу для точок 3,4,5

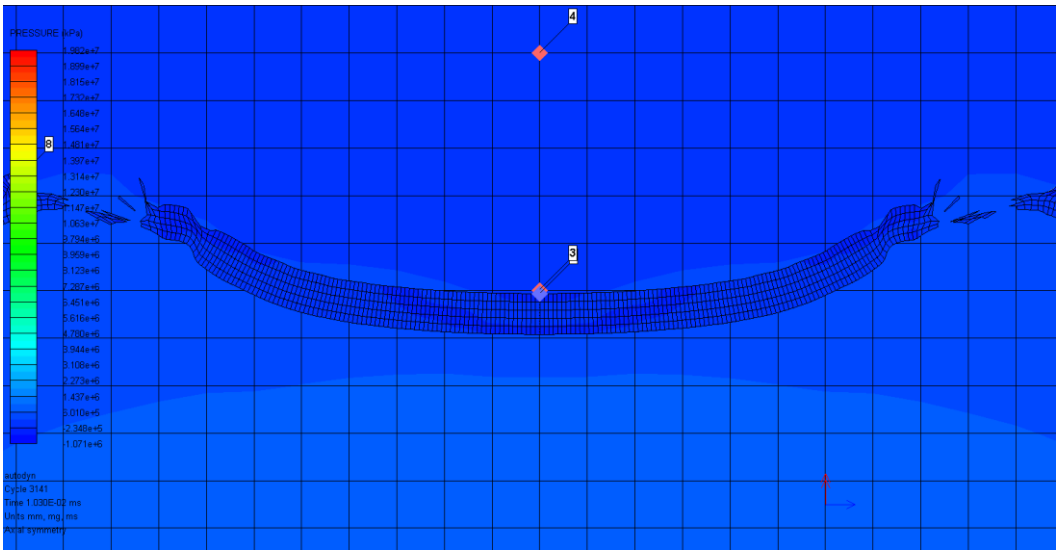


Рис.23 Досягнення Елементів оболонки точки 3

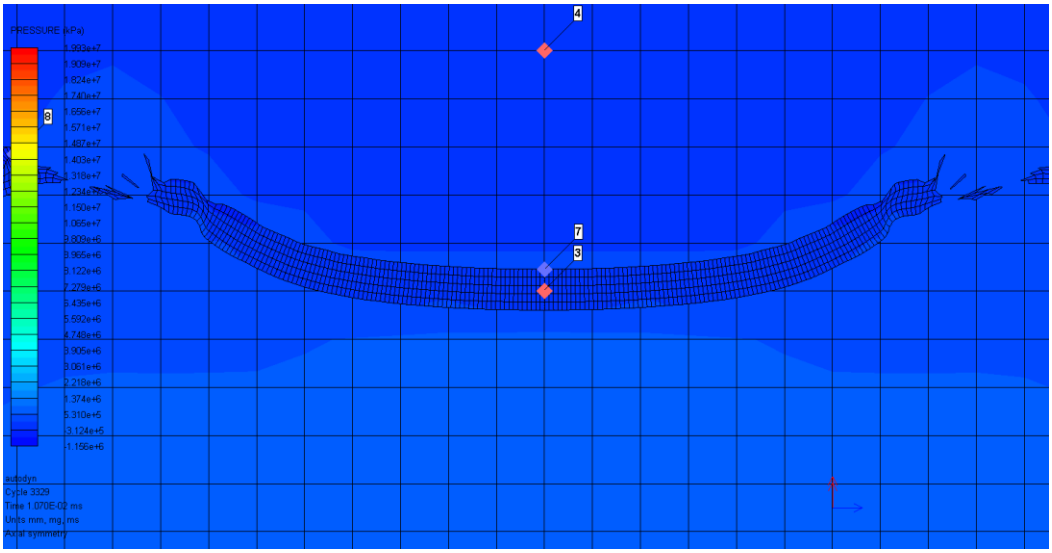


Рис.24 Проходження через точку 3 елементів оболонки

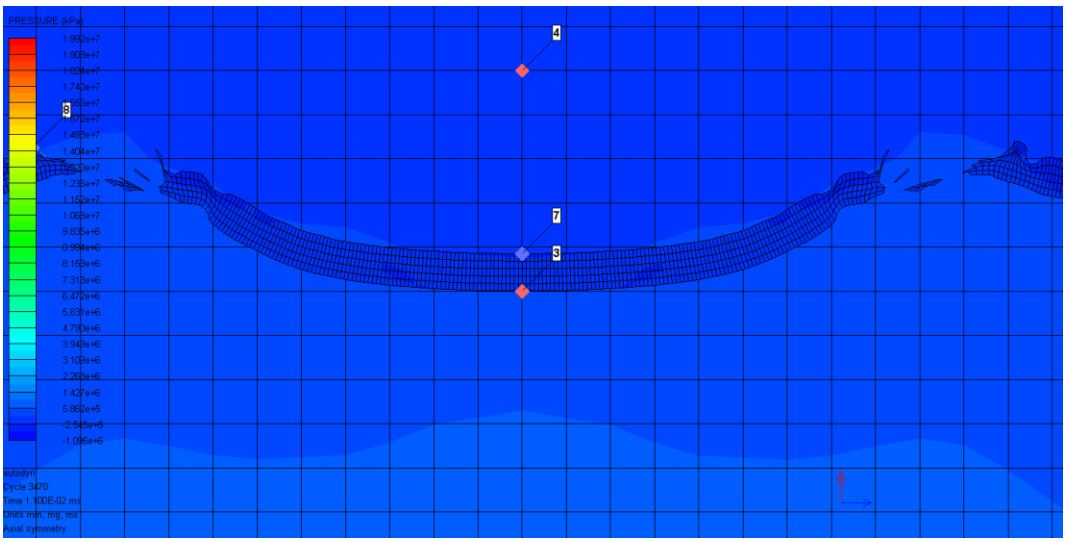


Рис.25 Повне проходження елементів оболонки і вхід поля тиску і точку спостереження

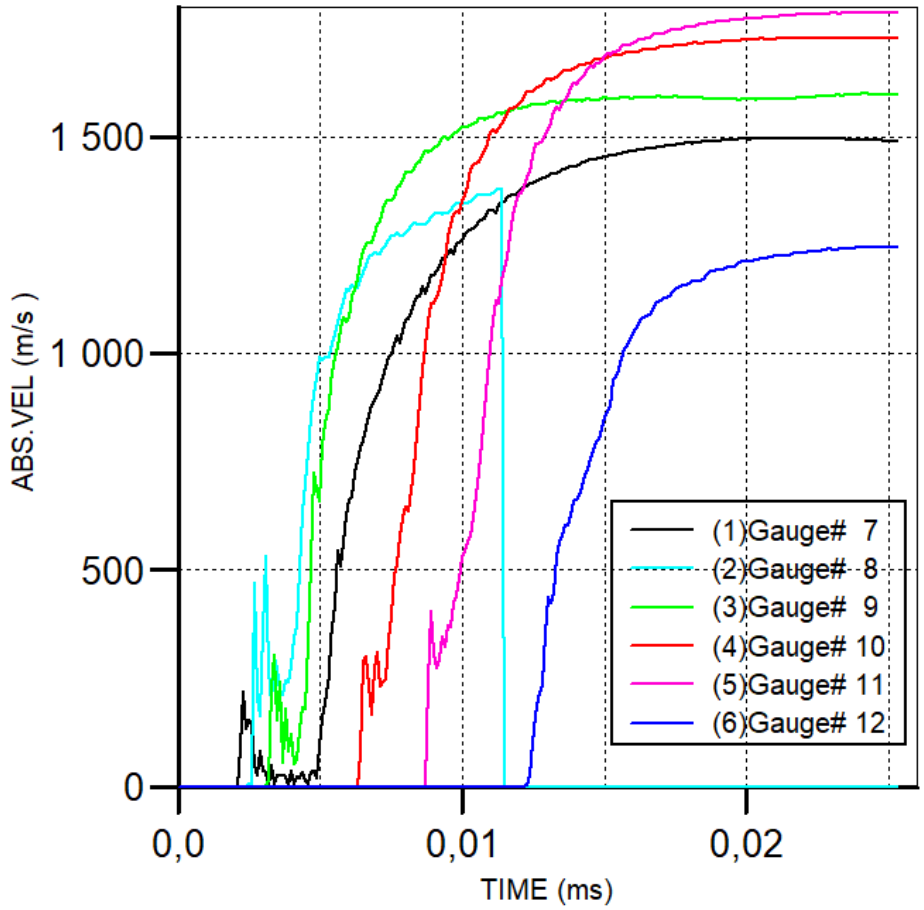


Рис.26 Графік залежності швидкості елементів оболонки від часу точок на оболонці

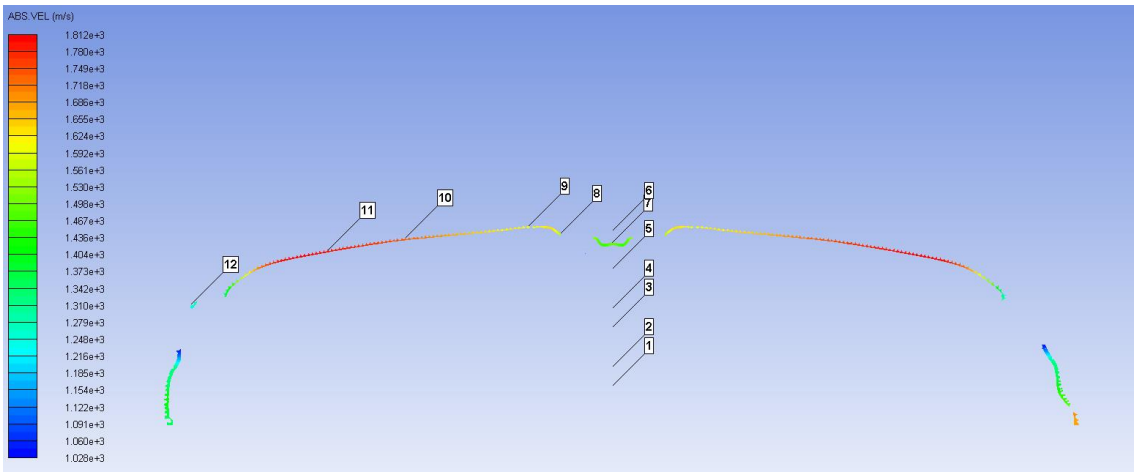


Рис.27 Профіль швидкості елементів оболонки

На рис.26 бачимо графік швидкості в опорних точках на оболонці і профіль оболонки з опорними точка. На графіках в більшості випадків бачимо різке зростання, на початкових точках зростання флуктуації пов’язані з відбиттям ударної хвилі. Значення точки 8 падає до нуля через ерозію комірки з опорною точкою.

Також варто звернути увагу на форму оболонки після проходження ударної хвилі (рис.28). Цей ефект може пояснюватись як «аномалія» обрахунку через різні розміри комірок сітки Ейлера та ALE (рис.29), що більш вірогідно, або такий ефект спостерігається при зварюванні металів вибухами, що менш вірогідно, адже для спостерігання такого ефекту мають виконуватись певні умови.

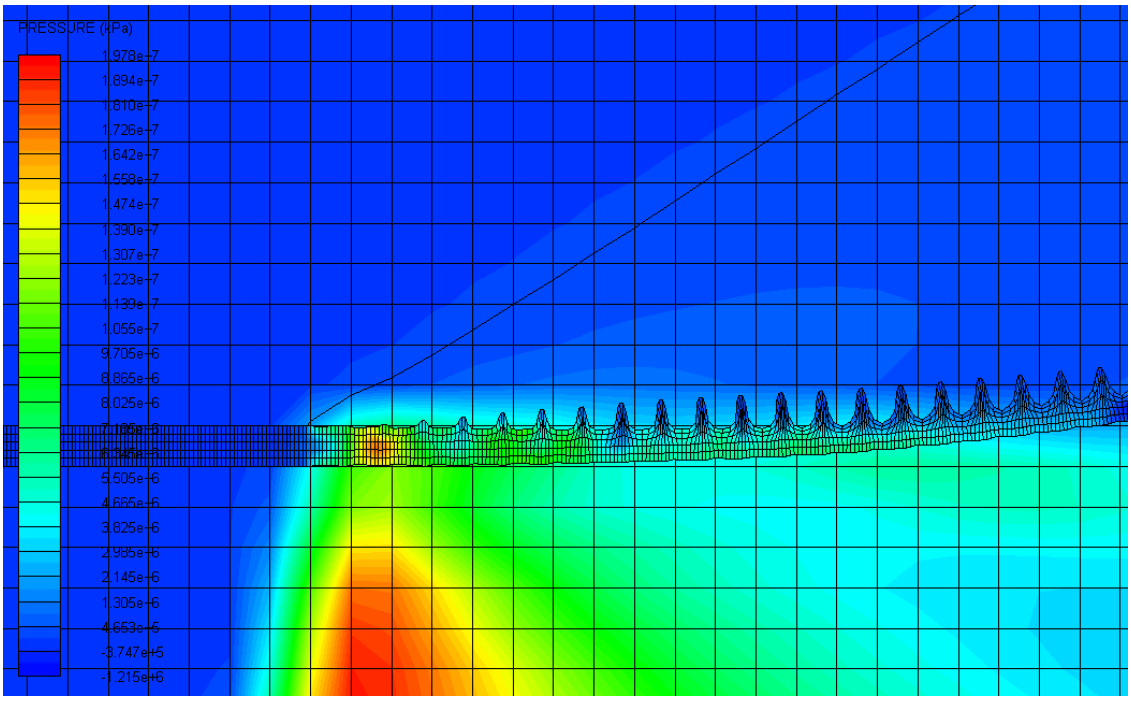


Рис. 28 Профіль тиску з явною флуктуацією оболонки

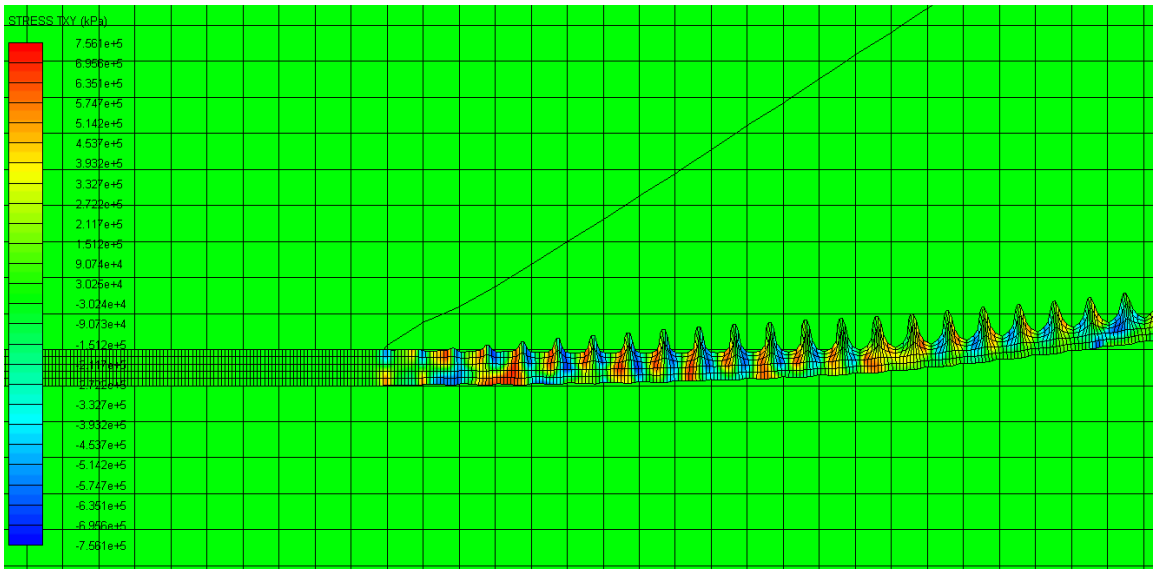


Рис. 29 Загальний тензор напружень, компонент XY

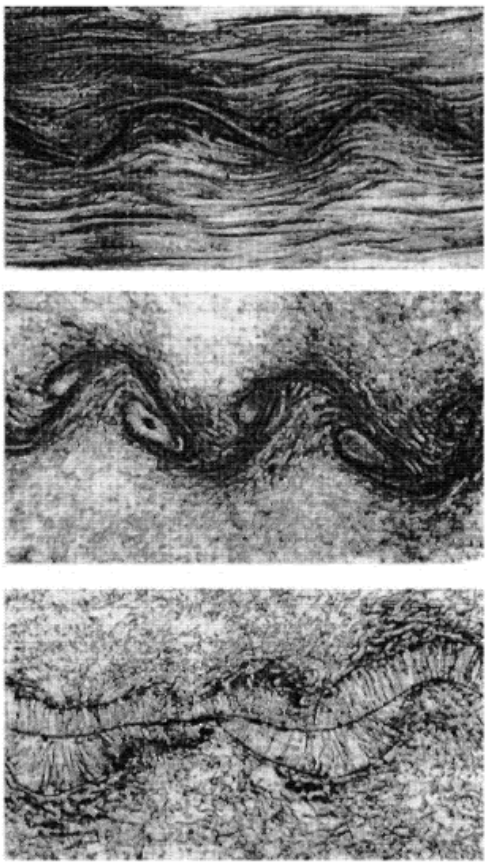


Рис.30 Характерні флуктуації при зварюванні вибухами [20]

3.2.1 точка детонації рівновіддалена від основи та бічної поверхні

Розглянемо таку саму модель, перемістивши точку детонації рівновідалено від бічної поверхні оболонки і основи.

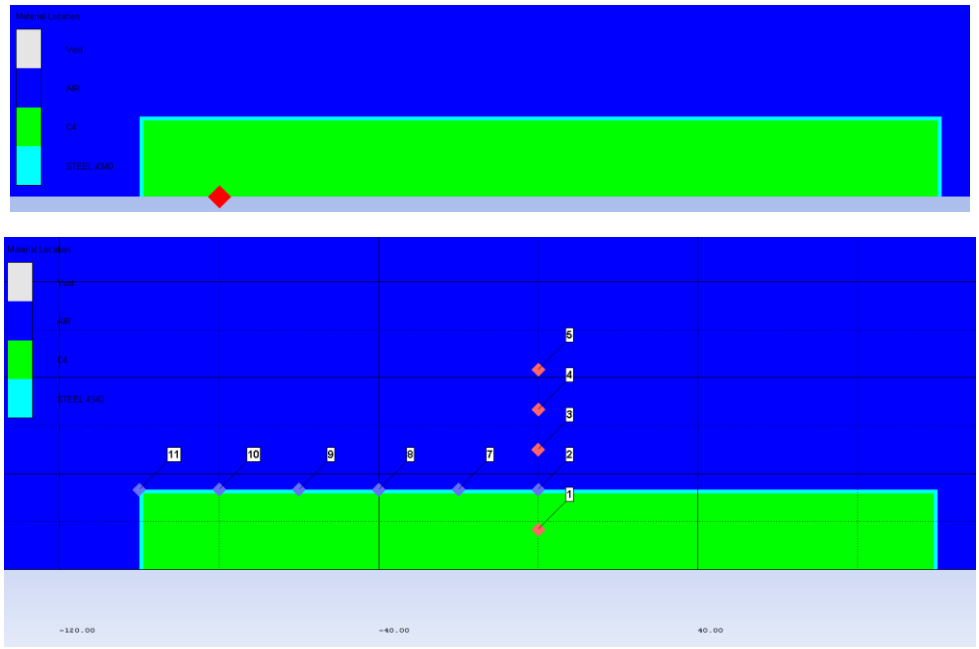


Рис.31 Геометричне представлення точки детонації та опорних точок для вимірювання

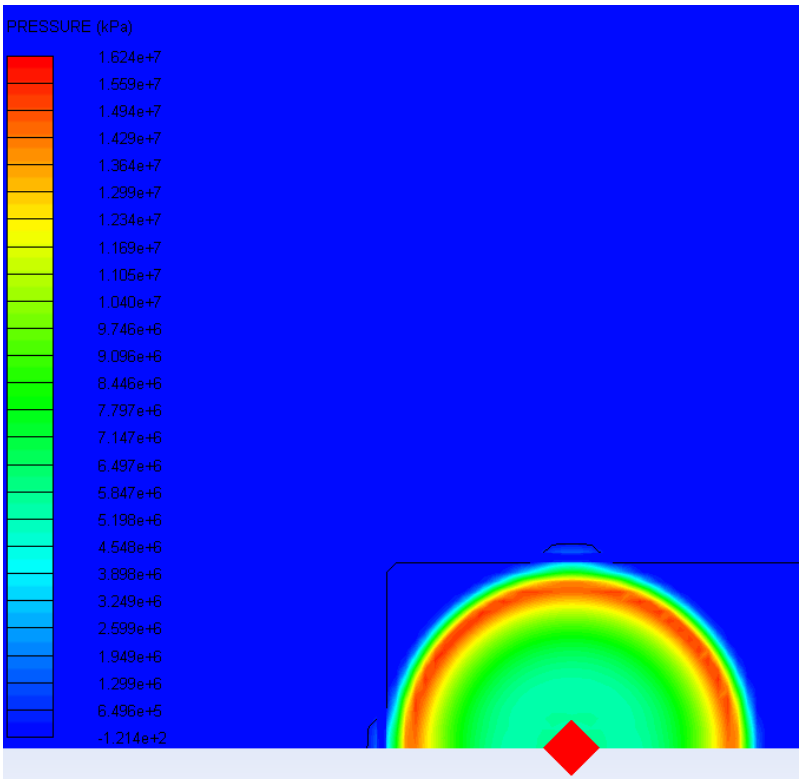


Рис.32 Етап досягнення ударної хвилі оболонки

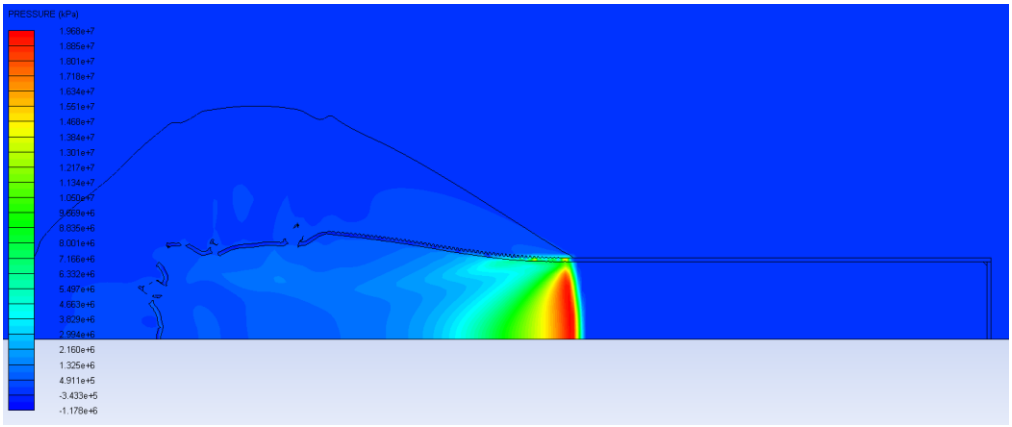


Рис.33 Етап проходження половини заряду ударної хвилі

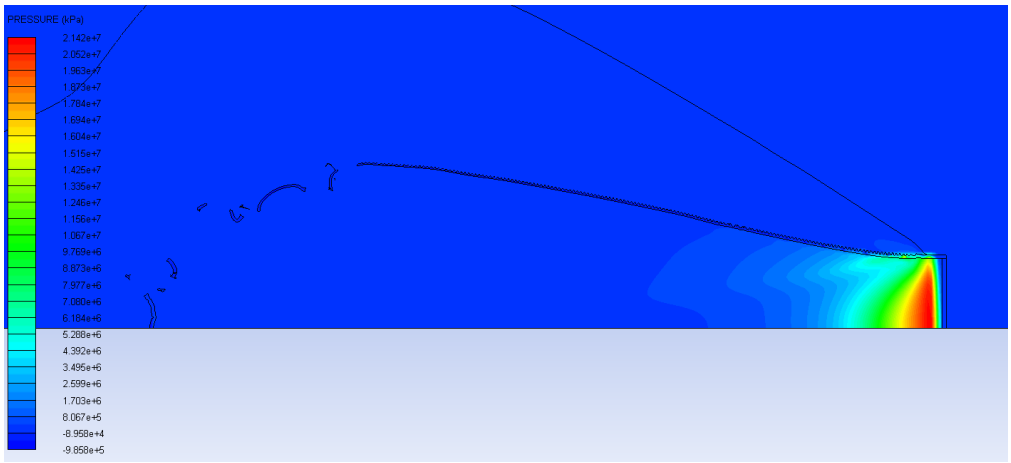


Рис.34 Етап досягнення нижньої основи ударною хвилею

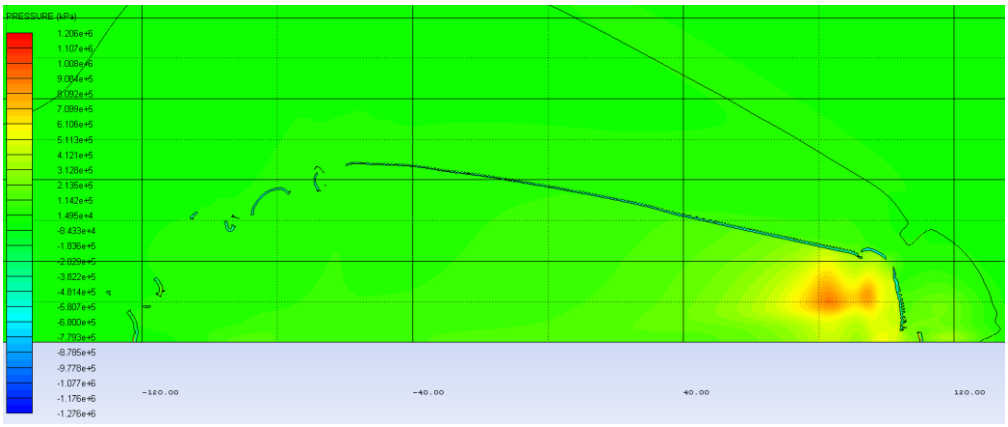


Рис.35 Профіль тиску на кінцевому етапі прорахунку

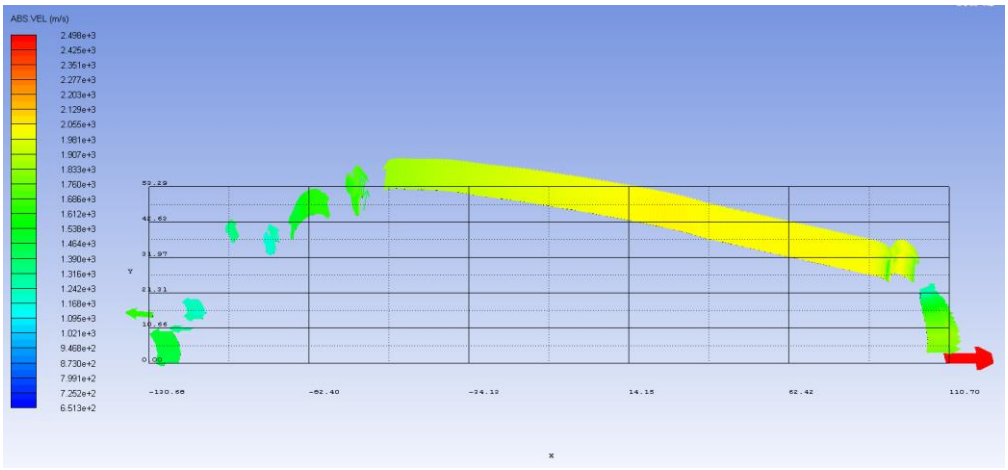


Рис.36 Профіль швидкості оболонки на кінцевому етапі прорахунку

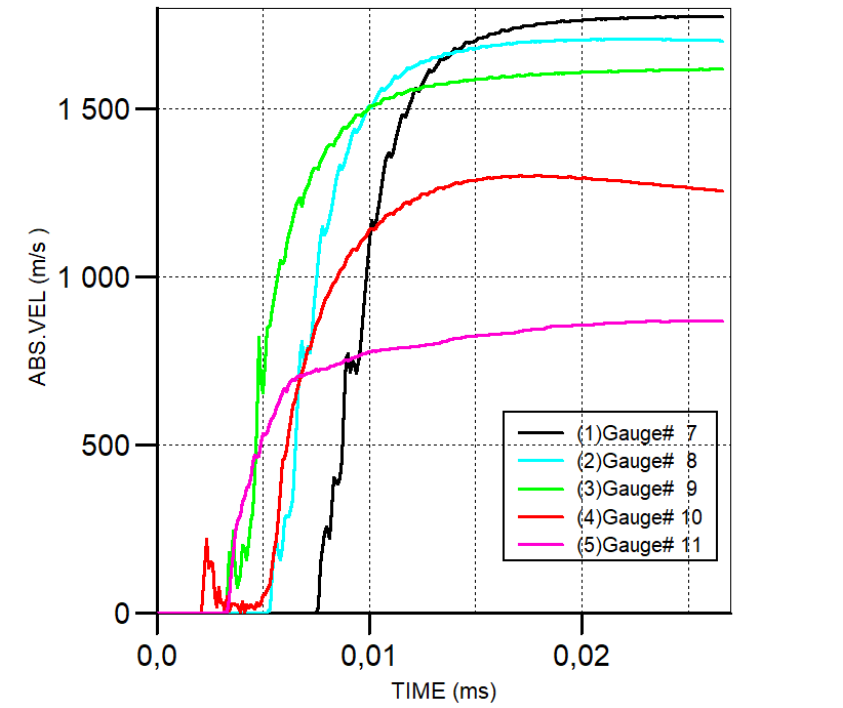


Рис.37 Графік швидкості від часу в опорних точках

З графіку (рис.34) залежності швидкості від часу видно що чим віддаленіше точка від початку детонації тим більша швидкість елементів оболонки.

3.2.2 дві рівновіддалені точки детонації

Розглянемо модель вже з двома точками детонації рівновіддалені на радіус циліндру від оболонки

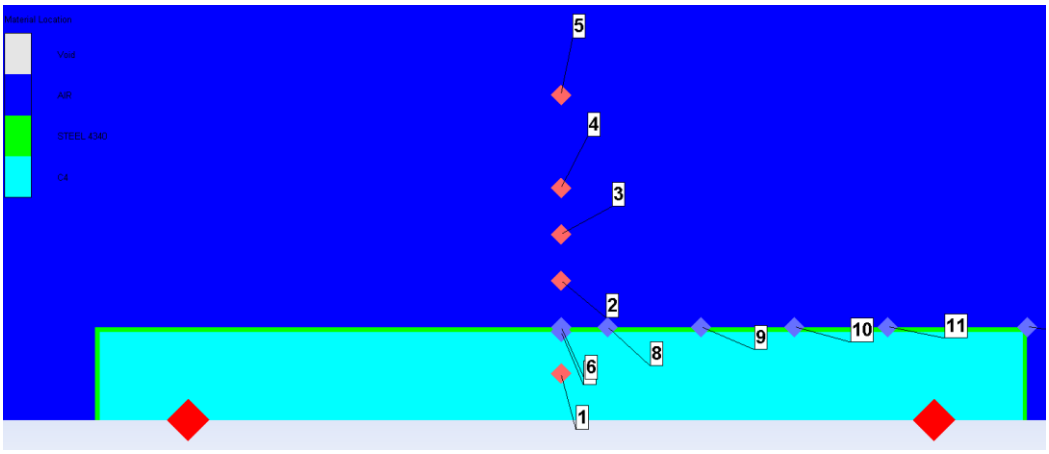


Рис.38 Точка 6 розміщена на зовнішній стороні оболонки, 7 на внутрішній

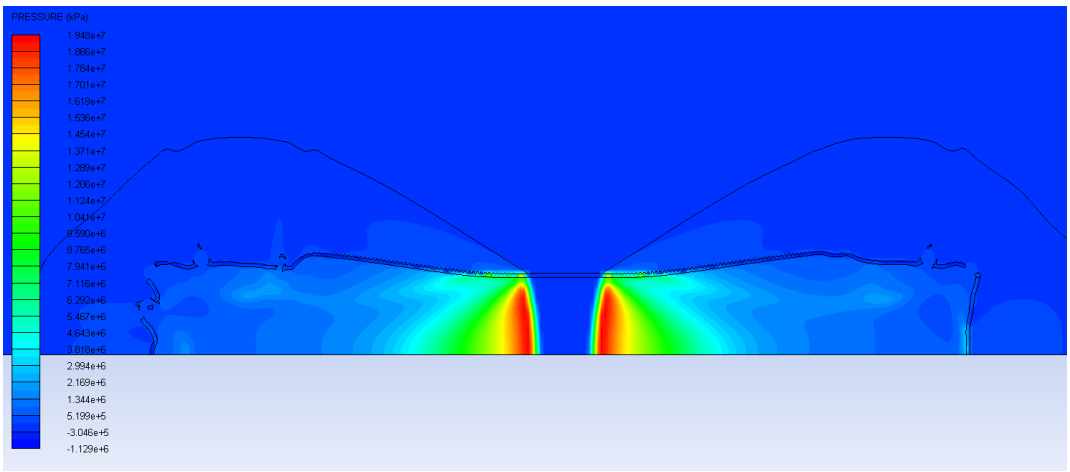


Рис.39 Момент сходження ударних хвиль в центрі заряду

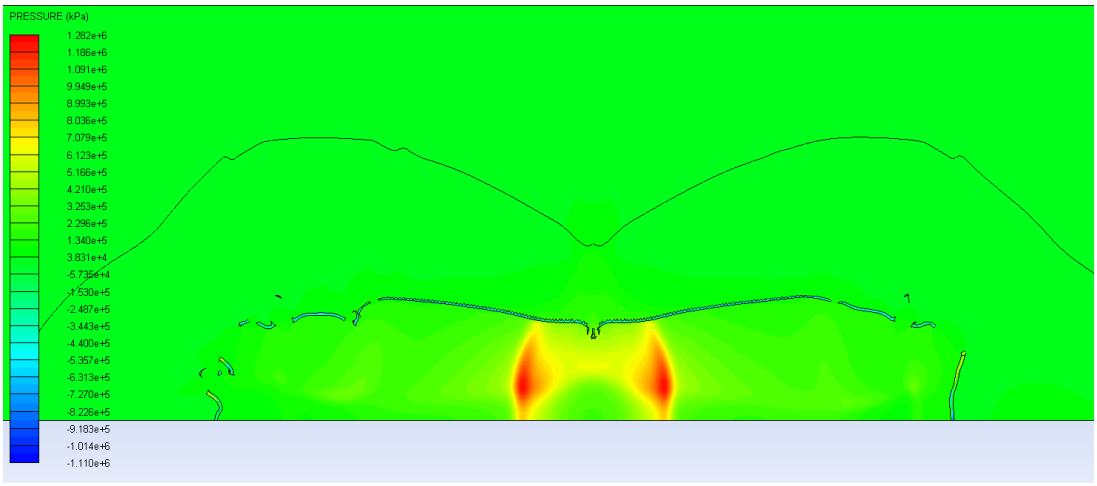


Рис.40 Профіль тиску на кінцевому етапі обрахунку

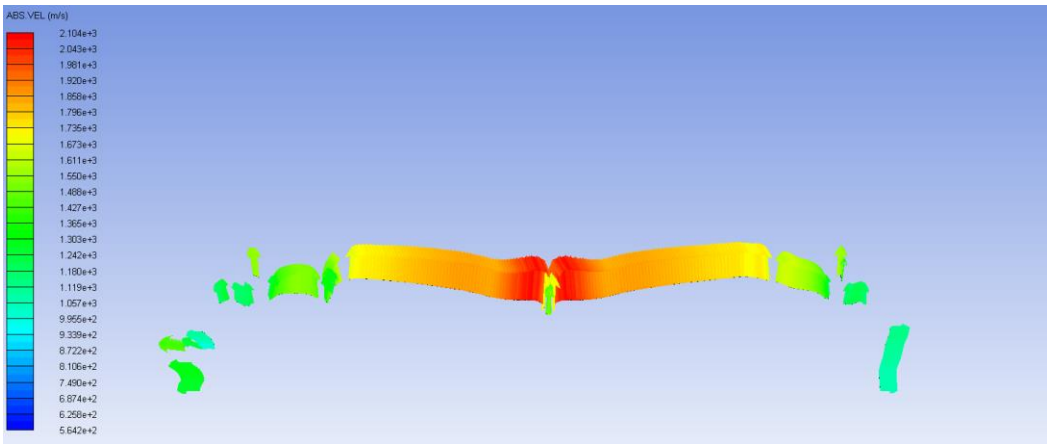


Рис.41 Профіль швидкості оболонки на кінцевому етапі обрахунку

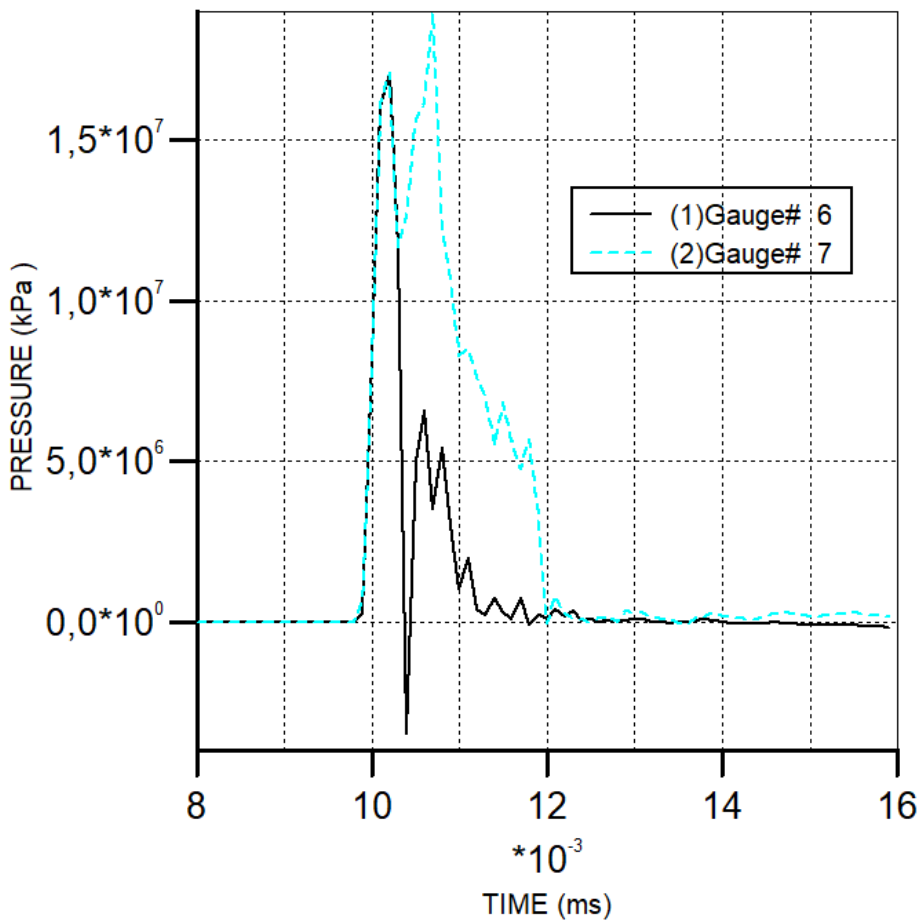


Рис.42 Графік тиску для точок 6, 7

З наведеного графіку (рис. 38) залежності тиску від часу для точок 6 та 7 спостерігаємо що ударна хвиля дійшла до точок в однаковий час пік обумовлений впливом об’єднаних ударних хвиль, і тиском на поверхню оболонки. Другий пік обумовлений надлишковим тиском в області спостереження. Хвиля розрідження представлена різким падіння після першої точки максимум.

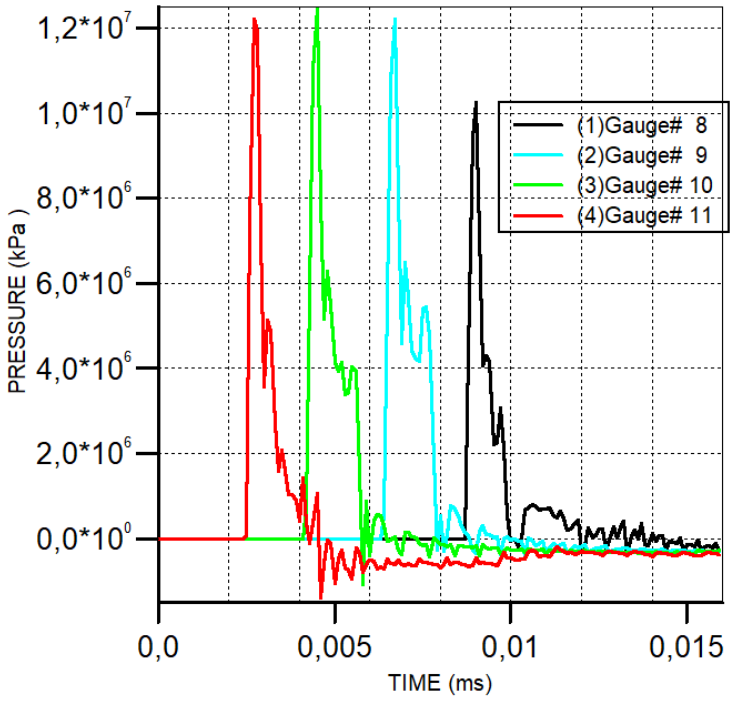


Рис.43 Графік тиску для точок 8, 9, 10, 11

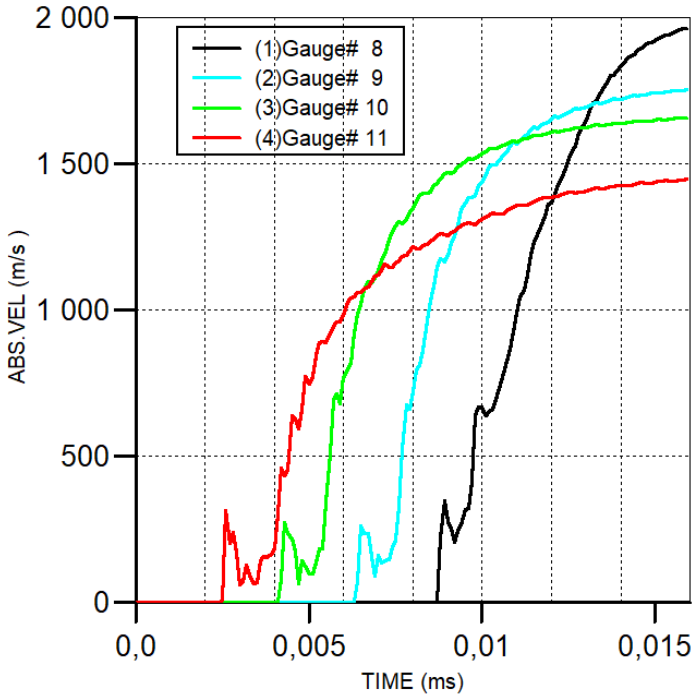


Рис.44 Графік швидкості для точок 8, 9, 10, 11

Спостерігаємо зростання швидкості в точці 8 до 2000 m/s (рис. 42) яке за рахунок підвищеного тиску в області удару двох хвиль, про що свідчить додаткова перевірка засобами AUTODYN. Через точку 8 провели вертикальну пряму довжиною 35 мм напрямлену до осі цилінда

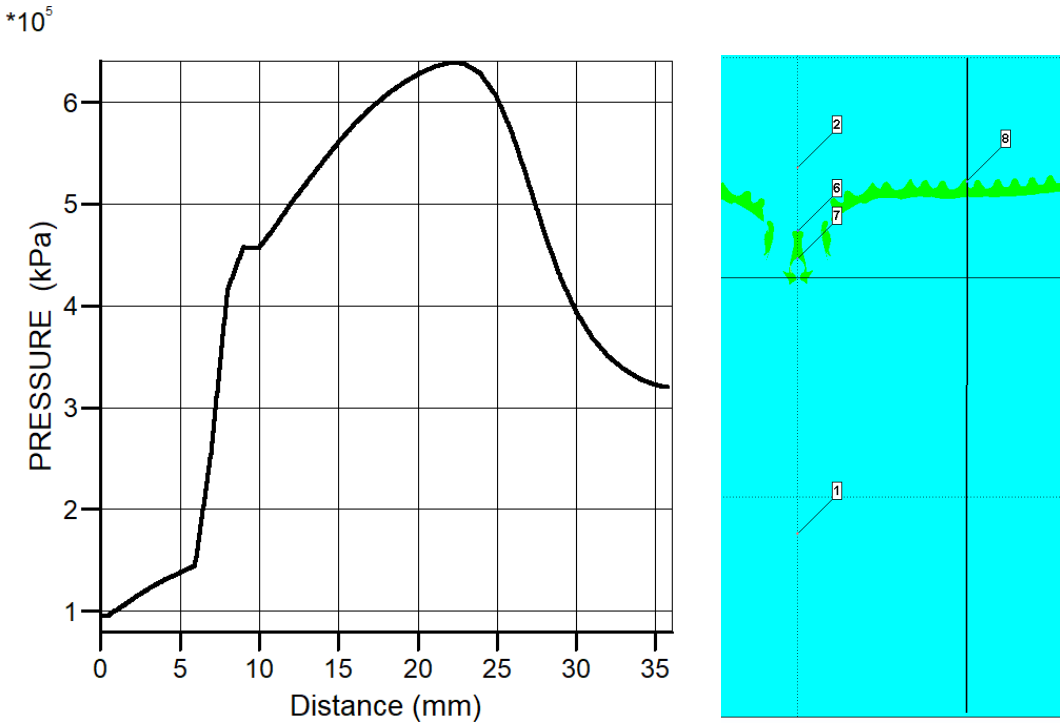


Рис.45 До точки 8 розподіл тиску вздовж прямої вертикалі

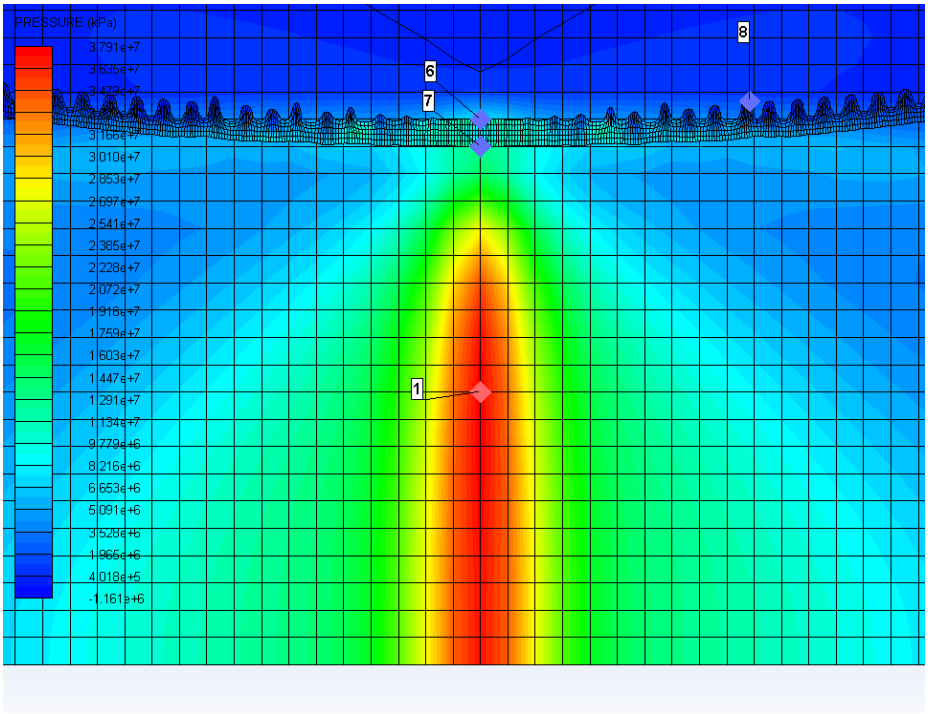


Рис.46 До графіку точок 6, 7 Профіль тиску в час удару двох хвиль детонації

3.3 $L/D = 10$ сферичні основи

Розглянемо модель з геометрією де в основі лежать сферичні кришки. Початкові етапи досягнення фронту детонаційної хвилі та проходження по об’єму співпадають з варіантом з плоскими кришками

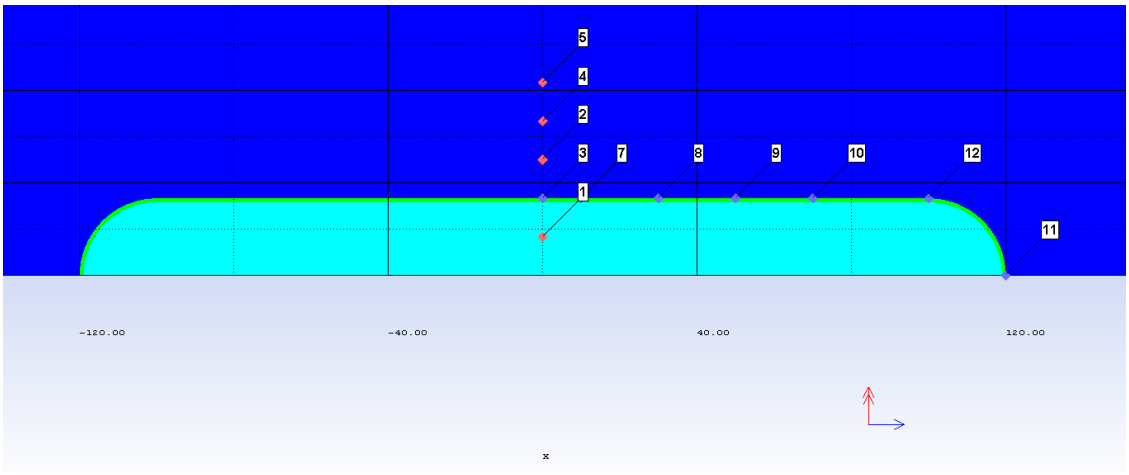


Рис.47 Геометрія моделі зі сферичними кінцями

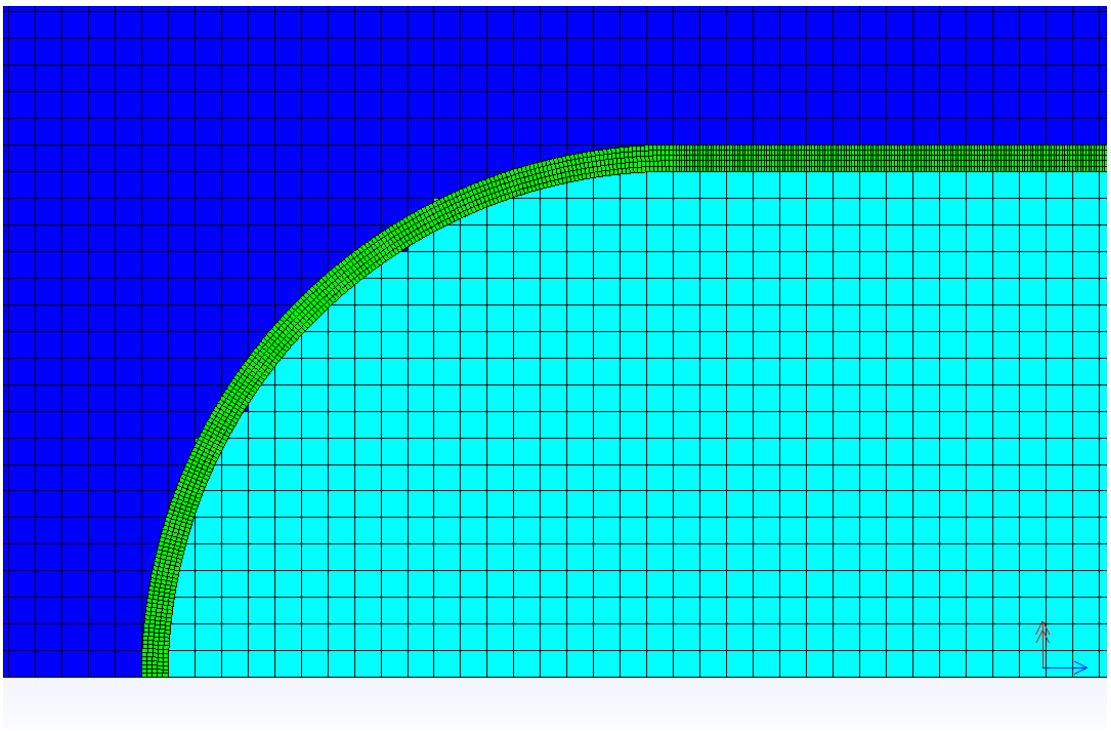


Рис.48 Параметри сітки

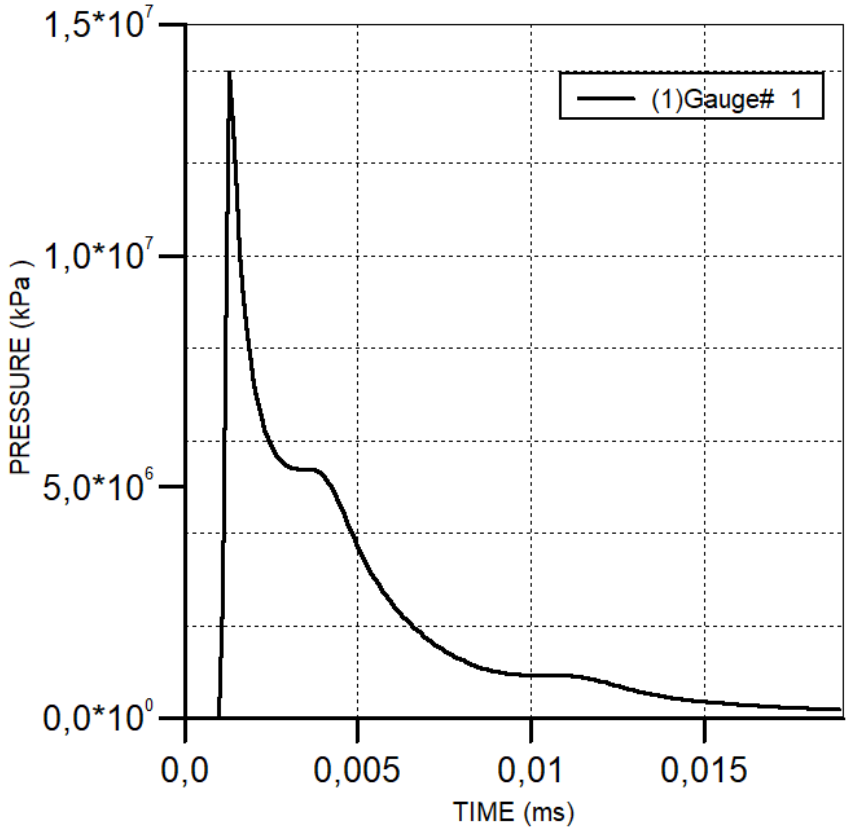


Рис.49 Графік залежності тиску від часу для точки 1

Як бачимо графіки для точок всередині вибухової речовини виглядають так само як і для попереднього моделювання, отже зосередимось саме на профілях тиску та швидкості.

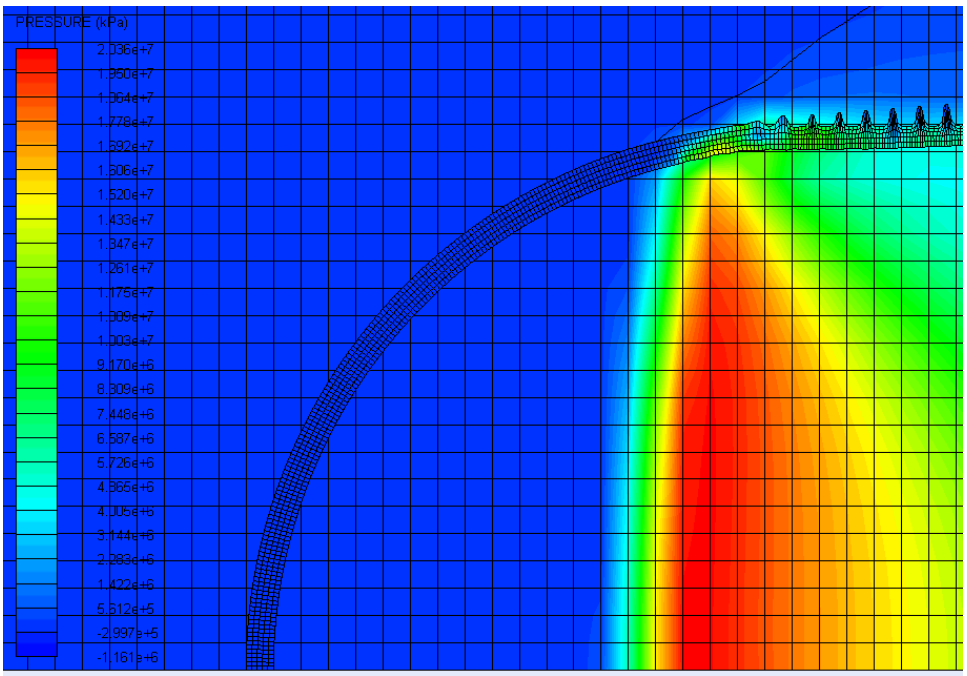


Рис.50 Момент переходу пласкої ударної хвилі в геометрію півсфери

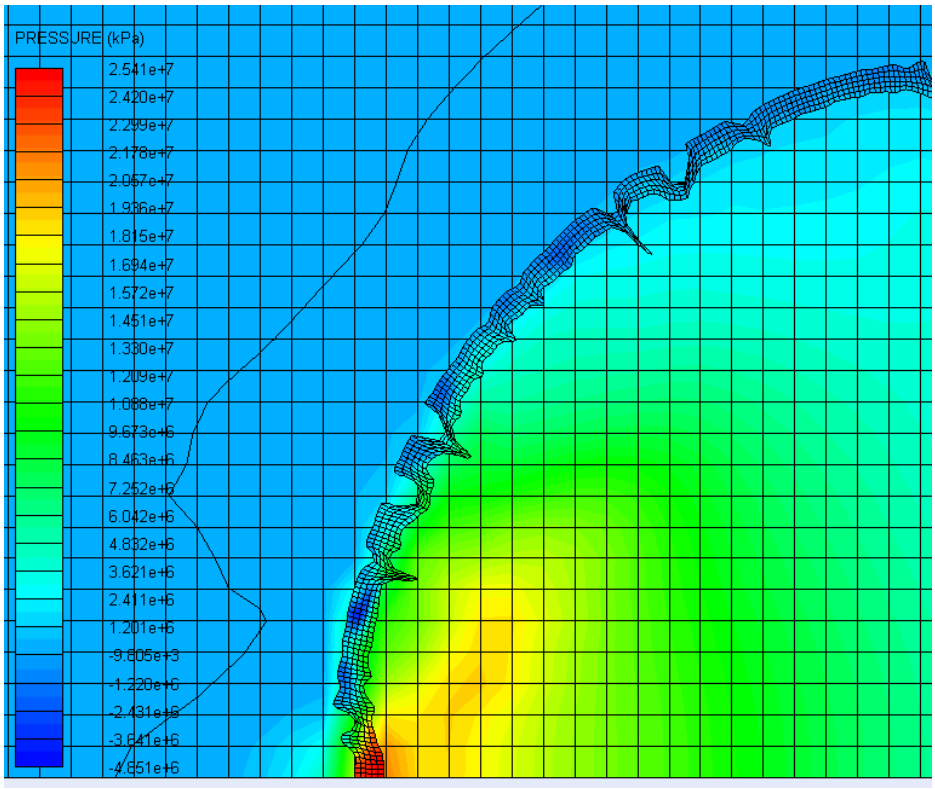


Рис.51 Момент досягнення вершини циліндра

Спостерігаємо характерні деформації в областях з ‘заглибленнями’ які зумовлені впливом хвилі розрідження.

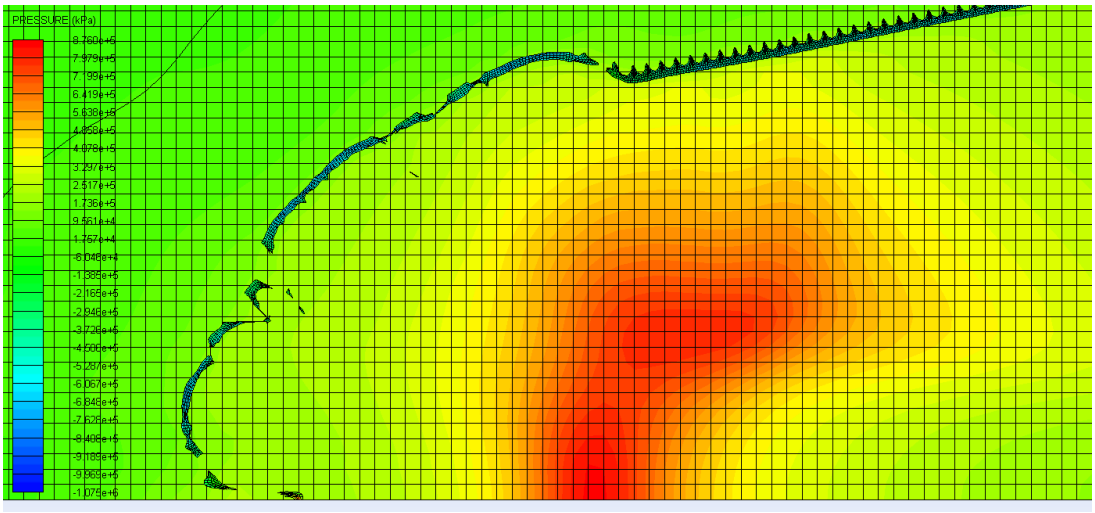


Рис.52 Відбиття ударної хвилі

На етапі відбиття хвилі від основ сферичної форми оболонки спостерігаємо ефект повторення форми.

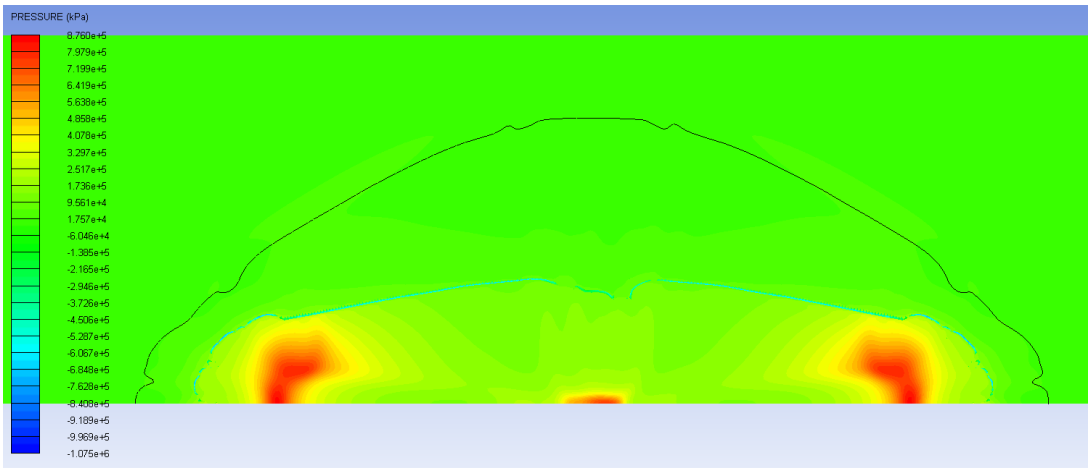


Рис.53 Профіль тиску для кінцевого етапу обрахунку

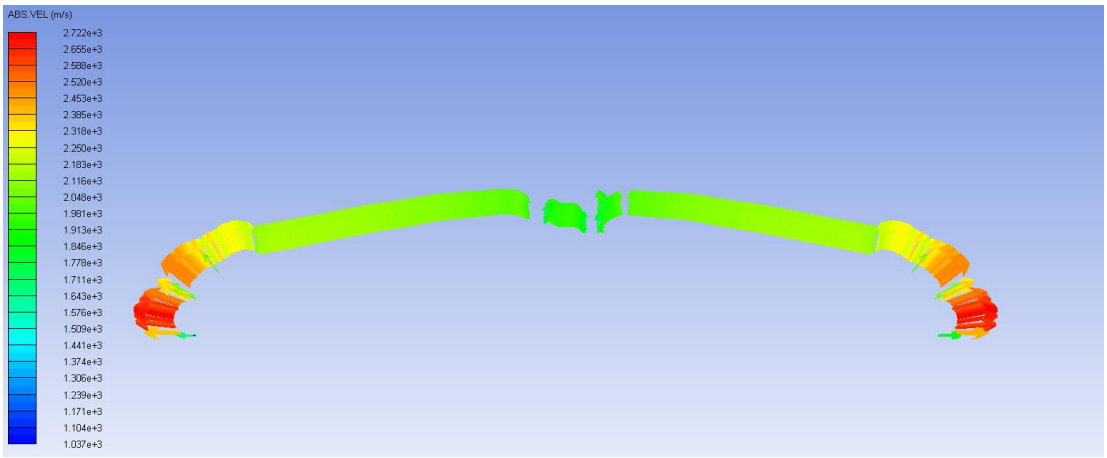


Рис.54 Профіль швидкості для кінцевого етапу обрахунку з векторами

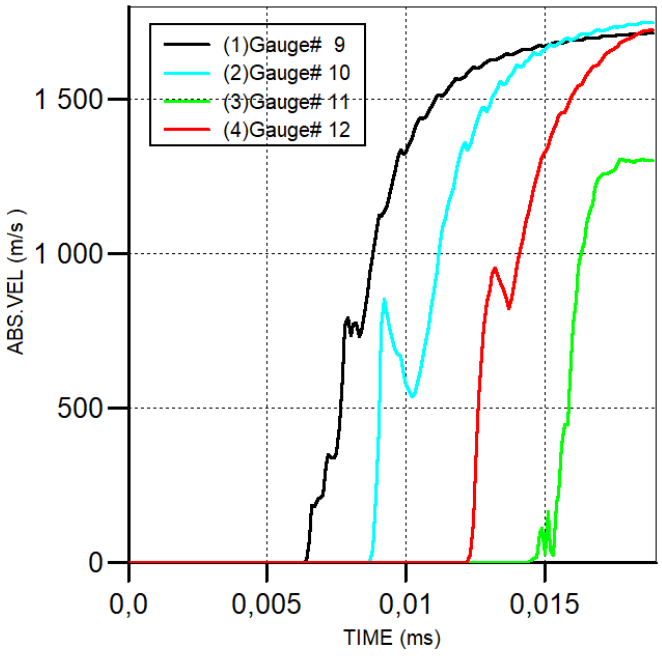


Рис.55 Графік швидкості для точок 9, 10, 11, 12

В точках 10 та 11 бачимо перепад значень, він пов’язаний з (аномальною) флуктуацією після проходження фронту ударної хвилі й утворення флуктуаційних деформацій поверхні.

3.4 $L/D = 10$ сферичні основи в об’єм

Роздягнемо заключний варіант геометрії заряду, в основі якого лежать на півсфери розгорнуті в середину. Точка детонації знаходиться в центрі заряду. Точка 12 знаходиться зі внутрішньої сторони оболонки, 13 на зовнішній.

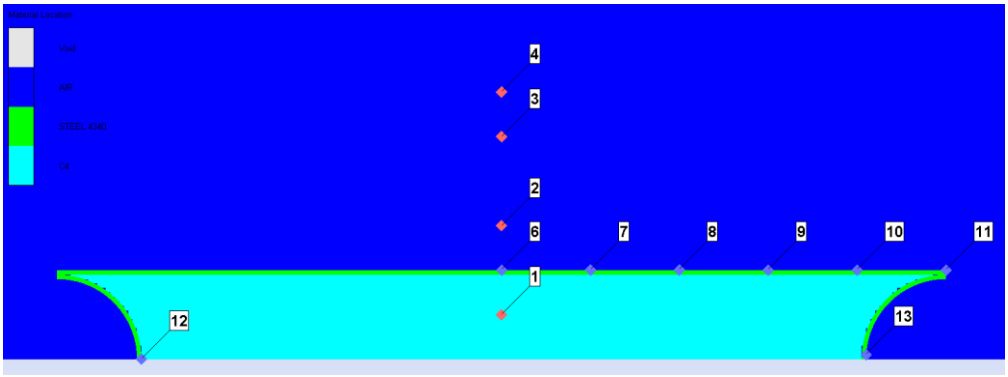


Рис.56 Геометрія моделі з опорними точками

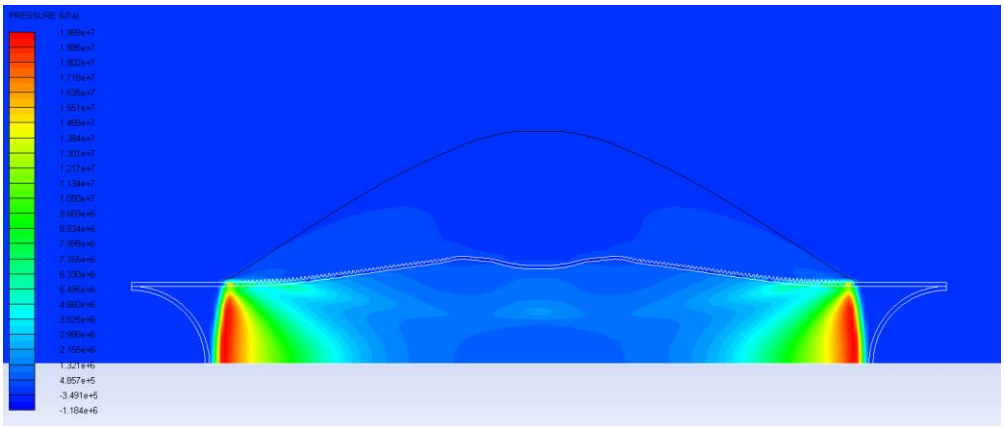


Рис.57 Етап обрахунку досягання ударної хвилі елементів оболонки

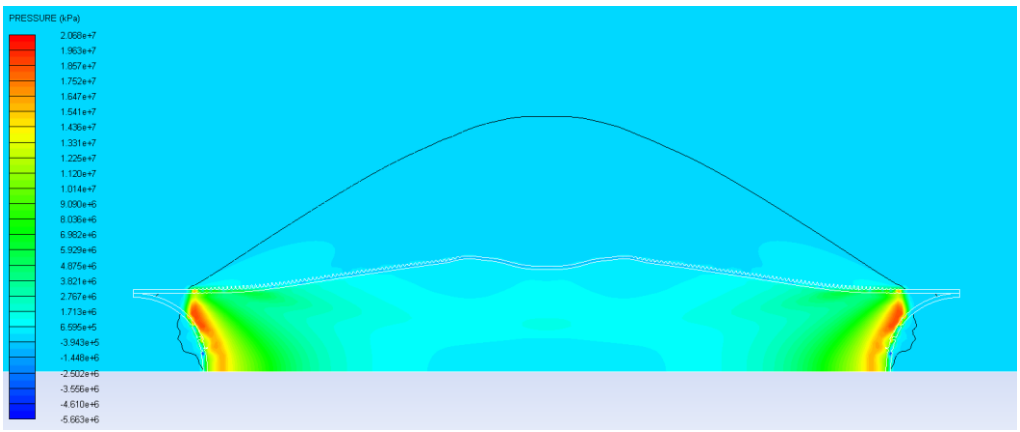


Рис.58 Етап протікання хвилі по оболонці

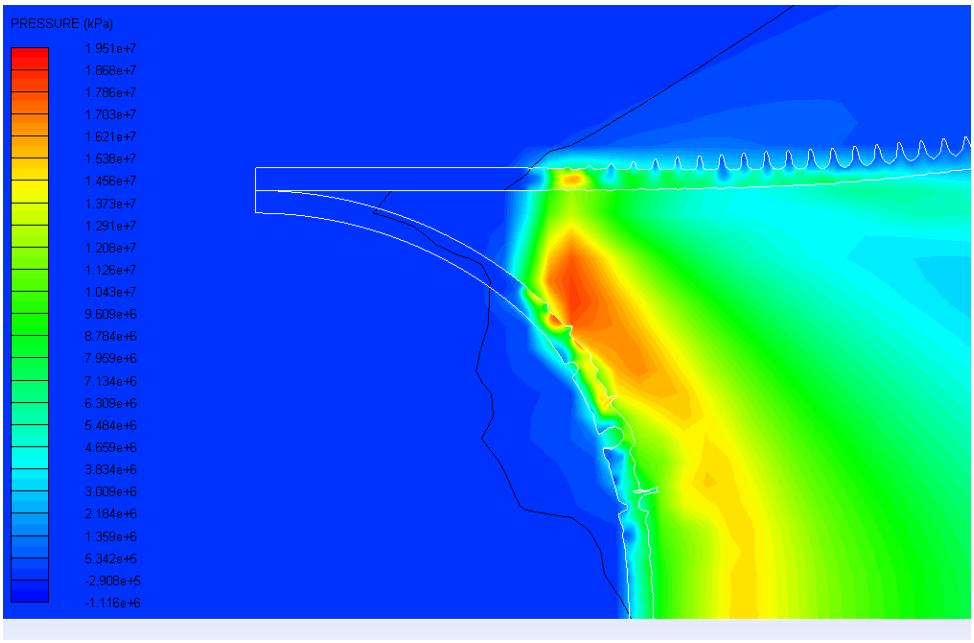


Рис.59 Збільшений масштаб лівої частини моделі

Далі будемо розглядати профіль тиску без урахування параметру тиску в оболонці для кращої наочності.

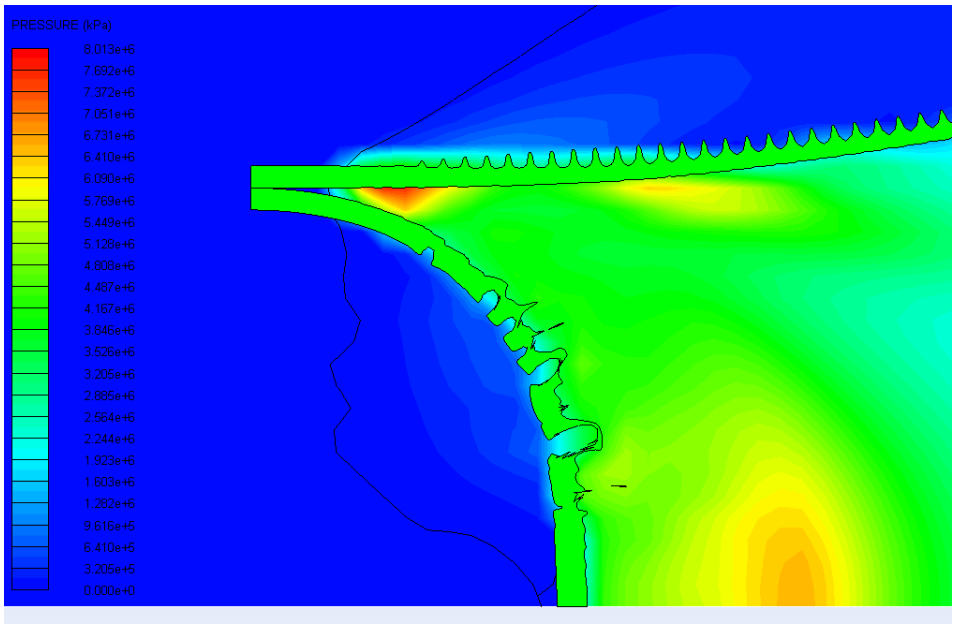


Рис.60 Відбиття від основи оболонки

На профілі бачимо що хвиля відбившись від оболонки кришки, ближче до осі, має характер пласкої, а вже починаючи з 45° повторює геометрію, відбивається і створює додатковий тиск на елементи бічної поверхні оболонки.

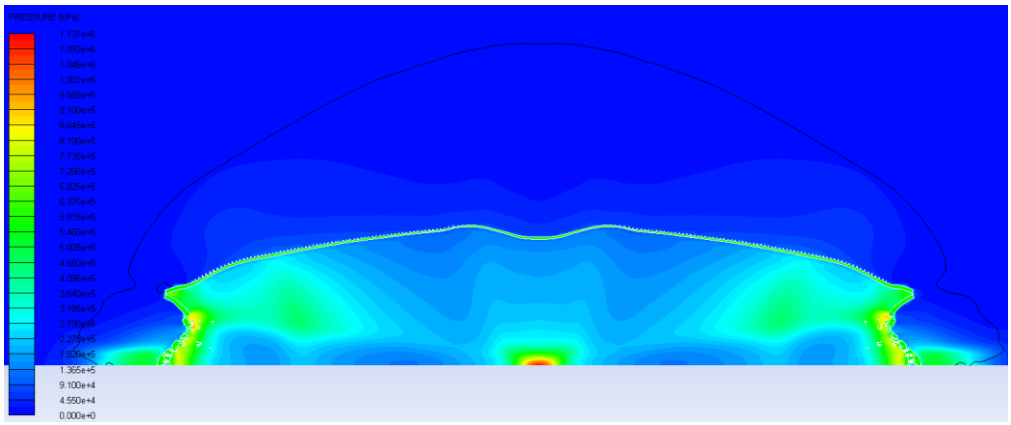


Рис.61 Повернення ударно хвилі в точку детонації

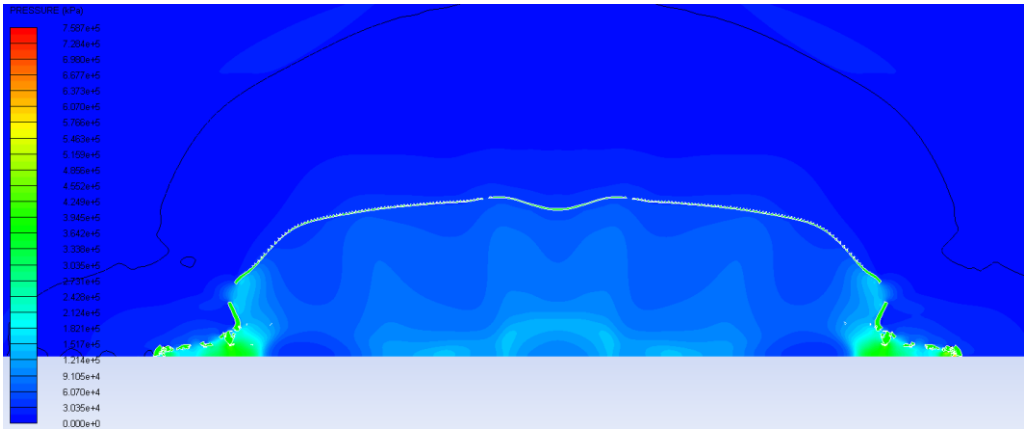
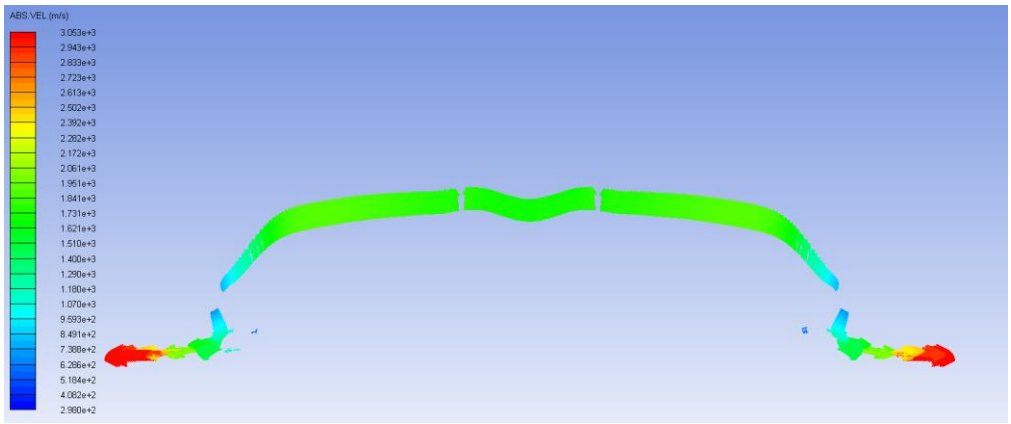


Рис.62 Кінцевий етап обрахунків

За рахунок форми кришки оболонки ми можемо спостерігати так званий ефект кумуляції – концентрації енергії в точці за рахунок виїмки в заряді.



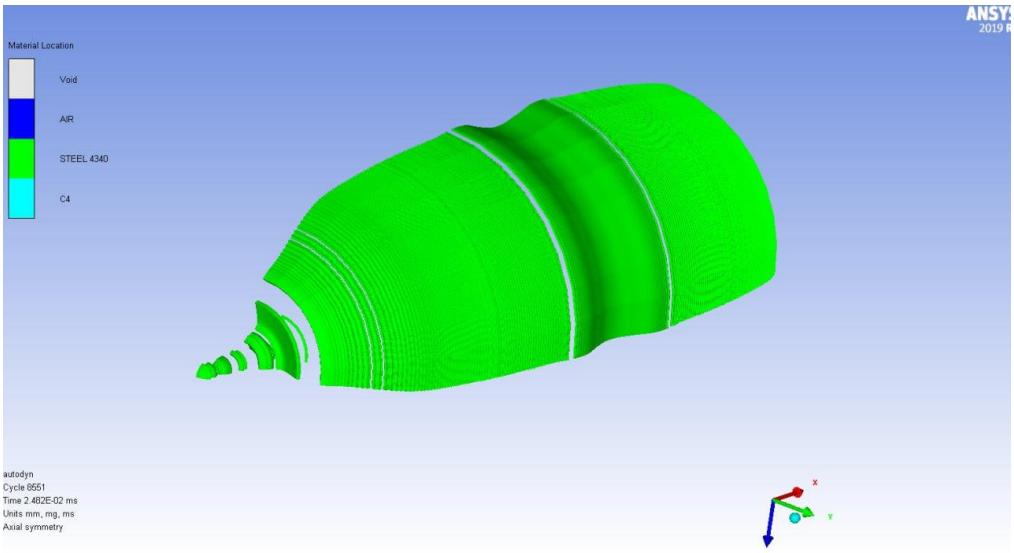


Рис.63 Профіль швидкості оболонки (зверху) та характер деформації оболонки (знизу) на кінцевому етапі обрахунку

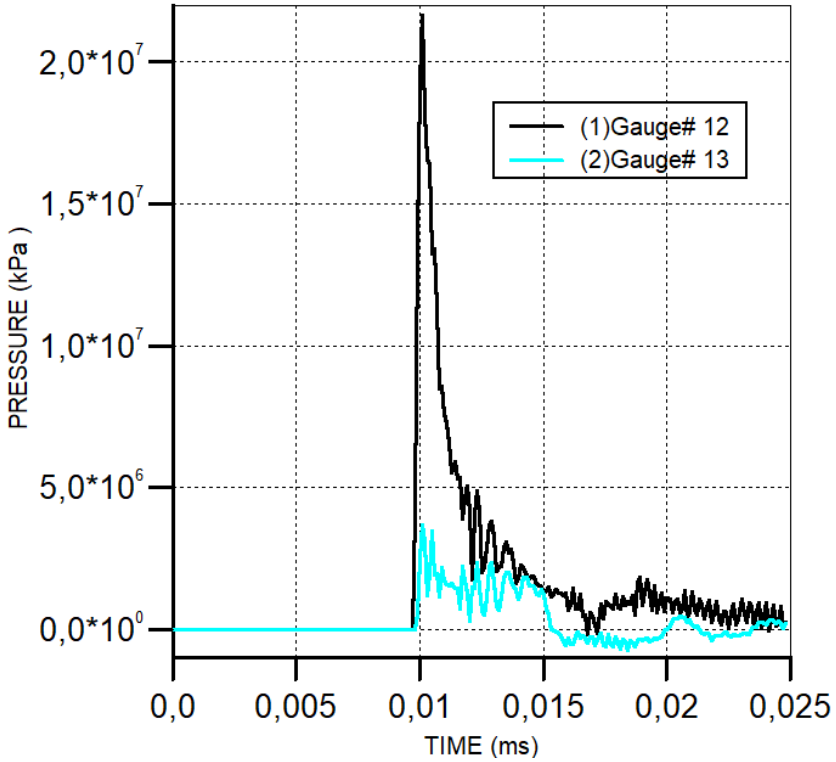


Рис.64 Графік тиску в точках 12, 13

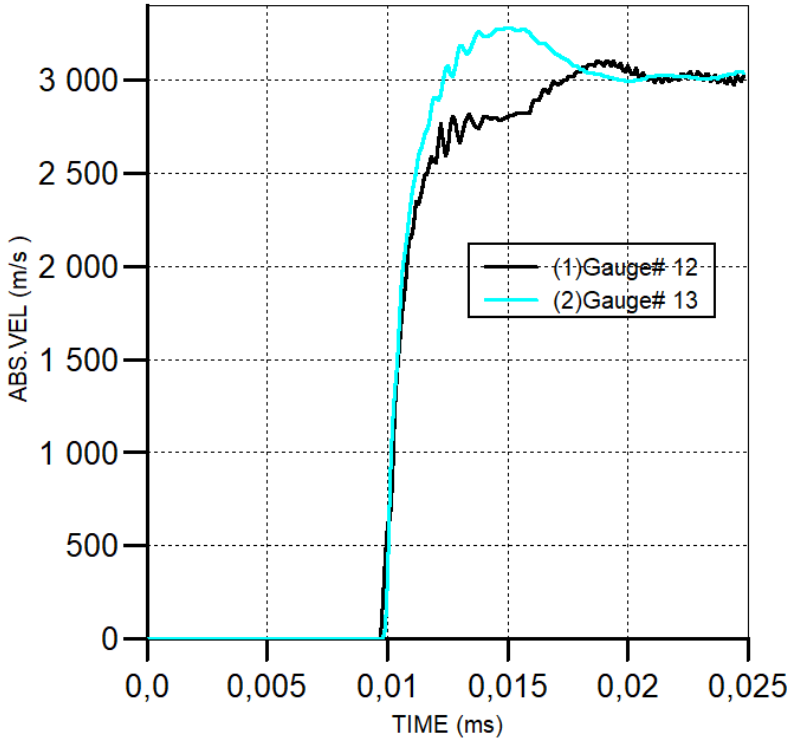


Рис.65 Графіки тиску і швидкості в точка 12, 13

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі розглянуто задачу моделювання програмним пакетом ANSYS AUTODYN ефектів детонації та поширення детонаційної хвилі в структурах різної геометрії із циліндричною симетрією. В результаті:

1. Показано, що хоча заряди циліндричної симетрії природно розглядати в 2D представлені, ремапінг результатів в 3D не враховує осьового розширення оболонки, відтак і можливого більш раннього руйнування оболонки.
2. Показано, що характер профілей тиску вибухової речовини, швидкості оболонки та розльоту уламків залежить від розміщення точки детонації, що надає можливість для контролю напрямку і уражаючої дії уламків.
3. Встановлено, що симетричне розміщення двох точок детонації біля пласких основ циліндру забезпечує як більш рівномірний розльот уламків, так і більші абсолютні значення швидкості розльоту уламків від осі симетрії, що особливо помітно в області удару відбитих від основ ударних хвиль: в центральній області швидкість розльоту сягала 2000 m/s, типові значення в точка віддалених від області удару – в межа1700 ÷1500 m/s
4. Встановлено, що сферичні основи циліндрів забезпечують як більш рівномірний розльот уламків від осі симетрії за рахунок фокусування ударної хвилі, так і збільшену швидкість руху оболонки від 2100 m/s до 2770 m/s.
5. Встановлено, що основи циліндру у вигляді напівсфер вигнутих всередину заряду додатково забезпечують ефект кумуляції ударної хвилі вздовж осі циліндра, де швидкість зруйнованих елементів оболонки сягала 3050 m/s.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. HANDBOOK OF SHOCK WAVES Gabi Ben-Dor Dzer Igra Tov Elperin - с 17-19
2. М. О. Смоліков, Г. Є. Монастирський Методика розрахунку термофізичних характеристик процесу поширення ударної хвилі в циліндричних об'єктах // XXII ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ – с. 99 - 104 URL:https://drive.google.com/file/d/1gCPaXLRwF2L_qQkwE3Nf9-GmNVBae6zs/view
3. Ansys Explicit Dynamics Analysis Guide 2024
4. Birnbaum, N. K., Francis, N. J. and Gerber, B. I. (1999). "Coupled techniques for the simulation of fluid-structure and impact problems". Computer Assisted Mechanics and Engineering Science
5. Woodruff J. P. KOVEC User's Manual. — Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1976. — URL: https://www.osti.gov/servlets/purl/7125855
6. Explicit Software for Nonlinear Dynamics Theory Manual Revision 4.3 – с 147-148
7. Mader C. L. Detonation properties of condensed explosives computed using the Becker-Kistiakowsky-Wilson Equation of State.
8. Cowperthwaite M., Zwisler. The JCZ equations of state for detonation products and their incorporation into the TIGER code. — Proceedings of the 6th Symposium (International) on Detonation, Coronado, 1972.
9. Fickett W. Detonation properties of condensed explosives calculated with an equation of state based on intermolecular potentials. — Report No. LA-2712, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, NM, 1962.
10. Metal acceleration by chemical explosives / J. W. Kury, H. C. Hornig, E. L. Lee, J. L. Mcdonnel, D. L. Ornellas, M. Finger, F. M. Strange, M. L. Wilkins. — Proceedings of the Fourth Symposium on Detonation, Office of Naval Research, Arlington, 1965.
11. Explicit Software for Nonlinear Dynamics Theory Manual Revision 4.3 – с 213-214
12. Lee E.L., Hornig H.C., Kury J.W., Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products, Report UCRL-50422, University of California, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA, USA, 1968 URL:https://www.osti.gov/servlets/purl/4783904
13. URL:https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/exd_ag/ds_ex_mat_jwleos.html%23ds_ex_mat_jwleos

14. Explicit Software for Nonlinear Dynamics Theory Manual Revision 4.3 - с 174-175
15. URL:https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/exd_ag/ds_ex_mat_johncookf.html%23ds_ex_mat_johncookf
16. Explicit Software for Nonlinear Dynamics Theory Manual Revision 4.3 - с 204-205
17. URL:https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/exd_ag/exp_dyn_theory_erosion_cont.html%23exp_dyn_theory_erosion_cont
18. Cooper P., Kurowski S. O. Introduction to Technology of Explosives. — Wiley-VCH, 1996.
19. Zukas J., Walters W. Explosive Effects and Applications. — Springer, New York, 1998.
20. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, испр. — В 2 т. Т. 2. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 656 с. ISBN 5-9221-0220-6.