

Знайдено просторовий розподіл вибухової речовини, при підриві якого створюється увігнутий фронт ударної хвилі. Це, в свою чергу, дозволяє сфокусувати енергію вибуху на заданій відстані від місця розташування вибухової речовини. При масі вибухової речовини рівною 2 тонни на відстані $r=20$ кілометрів області вибуху тиск на фронті вибухової хвилі буде $P>2$ атм

Ключові слова: ударна хвиля, вибухова речовина, фронт ударної хвилі, швидкість поширення хвилі

Найдено пространственное распределение взрывчатого вещества, при подрыве которого создается вогнутый фронт ударной волны. Это, в свою очередь, позволяет сфокусировать энергию взрыва на заданном расстоянии от места расположения взрывчатого вещества. При массе взрывчатого вещества равной 2 тонны на расстоянии $r=20$ километров области взрыва давление на фронте взрывной волны будет $P>2$ атм

Ключові слова: ударная волна, взрывчатое вещество, фронт ударной волны, скорость распространения волны

УДК 534.1, 534.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39034

СОЗДАНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

С. Н. Доля

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Объединенный институт
ядерных исследований
ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна,
Московской обл., Россия, 141980
E-mail: sndolya@yahoo.com

1. Введение

Подводная ударная волна представляет собой резкое сжатие воды.

Переднюю границу подводной ударной волны называют фронтом. Здесь давление имеет максимальное значение.

В момент прихода фронта подводной ударной волны в данную точку давление воды в этой точке увеличивается от гидростатического до максимального, находящийся здесь объект испытывает резкий удар.

Ниже будут рассмотрены условия создания ударной волны с плоским или вогнутым сферическим фронтом. Расположим в пространстве взрывчатое вещество в виде спирали с постоянным или переменным шагом и радиусом намотки спирали. Скорость распространения взрывной волны вдоль оси спирали становится меньше скорости распространения детонационной волны и эту скорость распространения взрывной волны вдоль оси спирали можно изменять как шагом, так и радиусом намотки спирали.

Расположим теперь такие спирали равномерно по боковой поверхности конуса, угол, при вершине которой выберем так, чтобы проекция скорости взрывной волны на высоту конуса была равна скорости звука и звуковая волна от протяженного во времени взрыва различных точек спиралей приходила в точку фокуса за одно и то же время.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Подводный взрыв характеризуется слабым затуханием ударных волн вследствие малой сжимаемости водной среды. В результате подводного взрыва заряда взрывчатых веществ возникает распространяющиеся

сферические или конусом волны взрыва, давление внутри которых значительно выше, чем в окружающей среде. Расширяясь, волны в воде ударную волну при ударе об атмосферу и границу двух сред. Когда фронт ударной волны достигает свободной поверхности, вода, находящаяся под действием огромного давления за фронтом ударной волны, движется по нормали распространения волн взрыва [1].

Известно создание направленной ударной волны, основанное на кумулятивном эффекте [2].

Кумулятивный эффект – усиление действия взрыва путём его концентрации в заданном направлении, достигая при этом концентрации в заданном направлении, достижимое применением заряда с выемкой, противоположной местонахождению детонатора и обращённой в сторону поражаемого объекта. Кумулятивная выемка, обычно конической формы, покрывается металлической облицовкой, толщина которой может варьироваться от долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Волна, распространяясь к боковым образующим конуса облицовки, схлопывает её стенки друг навстречу другу, при этом в результате соударения стенок облицовки давление в её материале резко возрастает. Давление продуктов взрыва, достигающее порядка 10^{10} Pascal (10^5 kg/cm²), значительно превосходит предел текучести металла, поэтому движение металлической облицовки под действием продуктов взрыва подобно течению жидкости, однако обусловлено не плавлением, а пластической деформацией.

Частным примером концентрации энергии взрыва в малом поперечном сечении является предложение по созданию ударной волны в водяном конусе, помещенном внутрь стального конуса [3]. В этом способе концентрации энергии конусы имеют размеры порядка ~1 м.

Обязательным условием полной концентрации энергии взрыва является синхронность подрыва отдельных элементов. Такую синхронность проще обеспечить при выделении энергии от электромагнитного взаимодействия. Типичным примером такого выде-

ления энергии являются взрывающиеся проволочки [4]. При разряде конденсатора с большой емкостью на отрезок металлической проволоки, в результате протекания тока, проволока плавится, испаряется, нагревается до высокой температуры и быстро расширяется.

Если сборку таких проволочек расположить цилиндрически симметрично и погрузить в воду [5], то после взрыва, в центре такой сборки, можно достичь давления в десятки тысяч атмосфер.

Надо, однако, сказать, что удельное энерговыделение при электрическом разряде значительно меньше, чем удельное энерговыделение взрывчатых веществ.

Способы концентрации энергии взрыва в фокусе, расположенном на расстоянии в десятки километров от области взрыва, в настоящее время не известны. В основу работы положены результаты, полученные при разработке и подаче заявки на изобретение, по результатам рассмотрения которой был выдан патент Российской Федерации на изобретение 2498199 [4].

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования являлось выяснение условий, при которых возможна передача энергии взрыва на большие (десятки километров) расстояния.

Ясно, что такая постановка задачи потребует некоего компромиссного решения. Если использовать взрыв малой временной длительности, то энергия взрыва будет сильно затухать при распространении в воде и на большие расстояния распространяться не будет [7].

При переходе к большим длительностям взрыва начнут сказываться волновые свойства распространяющегося в воде импульса взрывной волны. Временная длительность импульса взрывной волны связана с пространственной длиной волны λ соотношением $\lambda=cT$, где $c=1.5 \text{ km/s}$ – скорость звука в воде, T – длительность импульса. Угол расходимости взрывной волны, связанный с ее волновой природой, согласно определению Рэлея есть $\Theta=\lambda/D$, где D – диаметр излучателя.

В воде волны с длиной волны $\lambda \sim 1 \text{ m}$ уже достаточно слабо затухают, но для создания направленности $\Theta=10^{-2}$ придется использовать излучатель с диаметром $D=100 \text{ m}$. Тогда на расстоянии от взрывающегося вещества $F=20 \text{ km}$, размер фокусного пятна будет порядка $\delta=\Theta \cdot F=200 \text{ m}$.

Задачей, которую требовалось решить, было нахождение такого расположения взрывчатого вещества и условий его подрыва, при которых энергию взрыва можно было передать на значительное (десятки километров) расстояние.

4. Расположение взрывчатого вещества в пространстве и одновременность его подрыва

При поперечном размере расположенного в пространстве взрывчатого вещества порядка ста метров ($D=100 \text{ m}$) будет трудно решить проблему одновременности (синхронности) подрыва всех его частей. Для того чтобы сформировать вогнутый фронт взрывной волны, который позволит сфокусировать энергию волны в фокусе, можно воспользоваться регулировкой скорости распространения взрывной волны вдоль спирали. Именно таким образом удастся создать бегущую с переменной

скоростью взрывную волну, на фронте которой ускоряются физические тела до гиперзвуковых скоростей [8].

Расположим взрывчатое вещество, например, гексогеновый шнур, в пространстве так, как это показано на рис. 1.

На рис. 1 схематически показано взаимное расположение элементов.

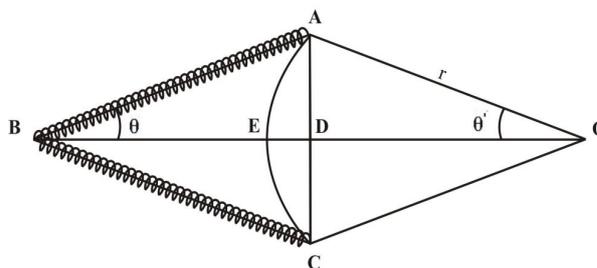


Рис. 1. Схема расположения аппаратуры

Треугольником ABC показано продольное сечение конуса с углом Θ при вершине В. Боковая поверхность конуса (на чертеже отрезки ВА и ВС) выложена гексогеновыми нитями, свернутыми в спираль. Всего таких спиралей $n=36$ и они расположены по азимуту через равные угловые промежутки, в данном случае $\Delta\Theta=100$. Угол при вершине конуса Θ , шаг и радиус намотки спирали выбирают такими, чтобы проекция скорости распространения взрывной волны на высоту конуса была равна скорости распространения звука в воде.

Тогда звуковая волна от взрыва любой точки спирали, придет одновременно на все основание конуса, в проекции в точки А, D и С. Если спирали намотать с переменными шагом и радиусом намотки, то можно сформировать сферический вогнутый фронт взрывной волны, сечение которого на чертеже показано точками А, Е, С. Такая сферически сходящаяся звуковая (ударная) волна сфокусируется в точке О, находящейся на радиусе r от конуса. При угле расходимости Θ' много меньшем Θ , радиус фокусировки будет много больше, чем высота конуса.

5. Выбор формы расположения взрывчатого вещества в пространстве

5. 1. Динамика взрыва

Для воды коэффициент сжимаемости равен [9] $k_{\text{water}}=5 \cdot 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$. Для давлений, меньших 10^3 atm , плотность воды в ударной волне мало отличается от плотности при нормальных условиях и скорость ударной волны примерно равна скорости звука: $V_{\text{water}} \approx V_{\text{sound}}=1.5 \text{ km/s}$ [9].

5. 2. Выбор раствора угла при вершине конуса

5. 2. 1. Сплошной гексогеновый конус

Рассмотрим условия формирования направленной взрывной волны сплошным гексогеновым конусом. Найдем раствор угол раствора конуса.

Если сравнить скорость распространения детонационной волны в гексогене и скорость распространения звука в воде, то можно видеть, что $V_{\text{det. wave}}=8.36 \text{ km/s}$ [10], значительно превосходит скорость звука в воде $V_{\text{sound}}=1.5 \text{ km/s}$, то для создания плоского фронта ударной (звуковой) волны надо выбрать угол раствора конуса равным:

$$\Theta_{\text{plane front } 1} = \arccos(V_{\text{sound}}/V_{\text{det. wave}}) = 0.18. \quad (1)$$

Соответствующий угол между скоростью детонационной волны и скоростью звука при этом равен: $\Theta_{\text{plane front } 1} = 80^\circ$.

Пусть диаметр основания такого конуса составляет: $D_{\text{cone}} = 150 \text{ m}$, а сам он имеет толщину $\Delta h_{\text{cone}} = 1 \text{ cm}$. Тогда, считая, что длина стороны конуса примерно равна половине диаметра основания, найдем, что площадь боковой поверхности конуса примерно равна площади основания: $S_{\text{lat. surf}} = \pi D_{\text{cone}}^2/4 = 7 \cdot 10^4 \text{ m}^2$, объем, занимаемый гексогеном: $V_{\text{cone}} = 700 \text{ m}^3$, считая плотность гексогена [10], равной: $\rho_{\text{hex}} = 1.8 \text{ g/cm}^3$, найдем, что его общая масса будет равна: $M_{\text{hex}} = \rho_{\text{hex}} \cdot V_{\text{cone}} = 1260 \text{ tons}$.

При подрыве такого конуса со стороны вершины в плоскости его основания образуется плоский фронт ударной волны. Однако использование такого количества взрывчатки кажется чрезмерным и длительность фронта, длительность нарастания давления во взрывной волне при этом будет чрезмерно короткой: $\tau_{\text{blast}} = \Delta h_{\text{cone}}/V_{\text{det. wave}} \approx 1 \mu\text{s}$, что приведет к очень быстрой диссипации энергии взрывной волны за счет затухания [7]. Как показано в [7], дальность распространения звука с частотой $f_{\text{sound}} = 4/\tau_{\text{blast}} = 0.25 \text{ MHz}$ составляет величину меньше 1 километра.

В то же время расстояние, на котором звук с частотой $f_{\text{sound}} = 2.5 \text{ kHz}$ уменьшает свою интенсивность в 10 раз за счет затухания, составляет величину порядка 100 km [6]. Чтобы увеличить на 2 порядка длительность фронта взрыва пришлось бы увеличить толщину Δh_{cone} конуса, что приведет к увеличению на 2 порядка массы взрывчатого вещества, которая и так, в данном варианте распределения, представляется чрезмерной.

5. 2. 2. Конус, выложенный спиралями

Выберем угол раствора конуса равным: $\Theta_{\text{plane front } 2} = 45^\circ$. Чтобы получить такой угол между направлением взрывной волны и скоростью звука в воде, необходимо замедлить скорость распространения взрывной волны. Это можно сделать, если «выложить» боковую поверхность конуса гексогеновыми нитями, свернутыми в спираль. Пусть всего таких нитей будет $n = 36$, то есть по азимуту они будут равномерно расположены через каждые 10 градусов.

Процесс замедления взрывной волны в спирали носит чисто геометрический характер: собственно детонационная волна распространяется по спирали со скоростью $V_{\text{det. wave}} = 8.36 \text{ km/s}$, скорость распространения взрывной волны вдоль оси спирали при этом меньше, она равна:

$$V_{\text{bl. wave}} = (h_{\text{spiral}}/2\pi r_0) \cdot V_{\text{det. wave}}, \quad (2)$$

где h_{spiral} – шаг намотки спирали, r_0 – радиус спирали.

Выберем радиус намотки спирали равным: $r_0 = 25 \text{ cm}$. Тогда диаметр такой гексогеновой спирали равен $d_{\text{spiral}} = 50 \text{ cm}$. Чтобы угол между скоростью взрывной волны и скоростью звуковой волны составлял: $\Theta_{\text{plane front } 2} = 45^\circ$, скорость взрывной волны, скорость распространения детонационной волны вдоль оси спирали, должна составлять $V_{\text{blast wave}} = 2.14 \text{ km/s}$ и шаг спирали должен быть равен:

$$h_{\text{spiral}} = (2\pi r_0/V_{\text{det. wave}}) \cdot V_{\text{blast wave}} = 40 \text{ cm}. \quad (3)$$

Пусть диаметр каждой гексогеновой нити составляет: $d_{\text{thread}} = 1 \text{ cm}$. Длина образующей конуса примерно в полтора раза превышает половину диаметра конуса, которую мы выбрали равной: $D_{\text{cone}} = 150 \text{ m}$,

$$l_{\text{gen}} = D_{\text{cone}}/2 \cdot \cos 45^\circ = 107 \text{ m}. \quad (4)$$

Вдоль образующей уместается $n = l_{\text{gen}}/h_{\text{spiral}} = 267$ витков спирали, так что общая ее длина, при длине витка $2\pi r_0 = 1.57 \text{ m}$, составит: $l_{\text{spiral}} = 420 \text{ m}$.

Объем каждой спирали, при диаметре гексогеновой нити равном:

$$d_{\text{thread}} = 1 \text{ cm}, \text{ будет равен: } V_{\text{spiral}} = (\pi d_{\text{thread}}^2/4) \cdot l_{\text{spiral}} = 3.3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3.$$

Масса одной гексогеновой нити будет равна:

$M_{\text{thread}} = \rho_{\text{hex}} \cdot V_{\text{spiral}} = 60 \text{ kg}$, общая масса гексогена в $n = 36$ спиралях, расположенных по боковой поверхности конуса будет равна:

$M_{\text{hex}} = M_{\text{thread}} \cdot 36 = 2.16 \text{ тонны}$. Энерговыведение гексогена при взрыве равно [9], 1.37 kcal/kg или 5.75 GJ/ton . Такое количество взрывчатого вещества, расположенного на боковой поверхности конуса, кажется приемлемым.

6. Пространственная и временная длительности фронта ударной волны

Временная длительность фронта такой волны будет короткой, порядка $\tau_{\text{front}} = \pi r_0/V_{\text{det. wave}} \approx 0.1 \text{ ms}$. Это связано с тем, что различные участки спирали взрываются последовательно, и проекция скорости взрывной волны на высоту треугольника как раз равна скорости звука. От двух точек, расположенных на диаметре, на одинаковом расстоянии от фокуса, взрывная волна, распространяющаяся вдоль высоты треугольника, придет с задержкой $\tau_{\text{front}} = \pi r_0/V_{\text{det. wave}} \approx 0.1 \text{ ms}$.

Считая величину τ_{front} половиной периода соответствующей этой длительности звуковой волны, найдем, что период волны T_0 равен: $T_0 = 4 \cdot \tau_{\text{front}} = 0.4 \text{ ms}$. Частота звуковой волны при этом равна: $f_{\text{sound}} = 2.5 \text{ kHz}$ и расстояние, на котором звук такой частоты уменьшит свою интенсивность в 10 раз, составляет величину порядка 100 km [7]. Такой частоте звуковой волны $f_{\text{sound}} = 2.5 \text{ kHz}$ соответствует длина волны: $\lambda_{\text{sound}} = V_{\text{sound}}/f_{\text{sound}} = 0.6 \text{ m}$.

7. Распространение плоского фронта звуковой волны конусом с углом при вершине, равным: $\Theta_{\text{plane front } 2} = 45^\circ$

Рассмотрим распространение звуковой волны, сформированной плоским фронтом. Дифракционный предел, минимальный угол расходимости такого плоского фронта будет равен:

$$\Theta_{\text{blast}} = (\lambda_{\text{sound}}/D_{\text{cone}}), \quad (5)$$

а размер области, занимаемой звуковой волной будет равен:

$$\Delta y = \Theta_{\text{blast}} \cdot F = (\lambda_{\text{sound}}/D_{\text{cone}}) \cdot F, \quad (6)$$

где F – расстояние до точки наблюдения, в нашем случае $F = 20 \text{ km}$.

Подставляя цифры в формулу (6): $\lambda_{\text{sound}} = 0.6 \text{ m}$, $D_{\text{cone}} = 150 \text{ m}$, $(\lambda_{\text{sound}}/D_{\text{cone}}) = 4 \cdot 10^{-3}$, получим $\Delta y = \Theta_{\text{blast}} \cdot F = (\lambda_{\text{sound}}/D_{\text{cone}}) \cdot F = 80 \text{ m}$.

Энергия взрыва гексогеновой спиральной будет равномерно распределена по телесному углу 4π и в пространственном минимальном угле расходимости будет сосредоточена лишь соответствующая малая часть всей энергии взрыва.

8. Давление на фронте звуковой волны

Оценим давление, на фронте звуковой волны исходя из следующих соображений. Общее энерговыделение взрыва равно:

$$\Delta Q = M_{\text{hex}} \cdot 5.75 = 12 \text{ GJ}. \quad (7)$$

При длительности импульса, равной: $\tau_{\text{front}} = 0.1 \text{ ms}$ мощность взрыва будет равна:

$$W = \Delta Q / \tau_{\text{front}} = 60 \text{ TW}. \quad (8)$$

Таким образом, интенсивность звуковой волны на фронте можно оценить как:

$$I = W/S = \Delta Q / 4\pi F^2 \cdot \tau_{\text{front}} = 2.5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2, \quad (9)$$

давление в звуковой волне будет равно:

$$P = (I_{\text{front}} \cdot \rho_{\text{water}} \cdot V_{\text{sound wave}})^{1/2} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ Pascal} = 2 \text{ atm}. \quad (10)$$

Такое давление, на расстоянии $F = 20 \text{ km}$ от точки взрыва, представляет практический интерес для ряда применений.

9. Формирование вогнутого сферического фронта звуковой волны конусом с углом при вершине, равным: $\Theta_{\text{plane front } 2} = 45^\circ$

Если при точечном взрыве можно получить только выпуклый сферический фронт, то при взрыве конуса, боковая поверхность которого выложена гексогеновыми нитями спиральной формы, можно получить как плоский, так и вогнутый сферический фронт.

Для получения плоского фронта надо, чтобы скорость распространения взрывной волны была постоянна и превосходила скорость распространения звука в воде, формула (2). Для получения вогнутого сферического фронта потребуются создать переменную, увеличивающуюся по мере распространения взрыва, скорость распространения взрывной волны.

Найдем условия, при которых время прихода фронта звуковой волны в точку фокуса O , будет одним и тем же при разрыве любой точки на спирали, то есть любой точки, лежащей на отрезке AB или BC на боковой поверхности конуса.

Обозначим отрезок BO – от вершины конуса до фокуса сферического фронта величиной l_0 . Расстояние AB мы обозначили величиной l_{gen} , тогда:

$$l_0 = l_{\text{gen}} \cdot \cos\Theta + (r^2 - l_{\text{gen}}^2 \cdot \sin^2\Theta)^{1/2}, \quad (11)$$

обозначим время, за которое звуковая волна пройдет расстояние l_0 как t_0 , так что

$$t_0 = l_0 / V_{\text{sound}}. \quad (12)$$

За такое же время t_0 звуковая волна должна доходить до точки O от любой точки, находящейся на спирали. Обозначим расстояние от точки B – вершины конуса, до этой некоей точки как x . Тогда расстояние от этой точки x до точки O – центра сферы равно r_1 :

$$r_1^2 = (x \cdot \sin\Theta)^2 + (l_0 - x \cdot \cos\Theta)^2. \quad (13)$$

При удалении точки фокуса O на расстояние, много большее, чем высота или боковая сторона конуса, вогнутый сферический фронт волны будет почти плоским, то есть скорость распространения взрывной волны $V(x)$ вдоль боковой поверхности конуса будет почти равной $V_{\text{blast wave}}$. Представим $V(x) = V_{\text{blast wave}} + \delta V$, где $\delta V \ll V_{\text{blast wave}}$.

Найдем δV из соотношения:

$$V(x) \cdot \cos\Theta = V_{\text{blast wave}} \cdot \cos\Theta + \delta V \cdot \cos\Theta. \quad (14)$$

Для времени, соответствующего прохождению взрывной волной боковой поверхности конуса $t_{\text{lat. surf}} = l_{\text{gen}} / V_{\text{blast wave}}$, разница между $V(x) \cdot \cos\Theta \cdot t_{\text{lat}}$ и $V_{\text{blast wave}} \cdot \cos\Theta \cdot t_{\text{lat}}$ равная $\delta V \cdot \cos\Theta \cdot t_{\text{lat}}$ равна a – высоте хорды:

$$a = [r^2 - (r^2 - l_{\text{gen}}^2 \cdot \sin^2\Theta)]^{1/2}, \quad (15)$$

откуда:

$$\delta V = [r^2 - (r^2 - l_{\text{gen}}^2 \cdot \sin^2\Theta)]^{1/2} / \cos\Theta \cdot t_{\text{lat}}. \quad (16)$$

Зависимость скорости распространения взрывной волны $V_x(x)$ слабая и можно выбрать, например, $\delta V_1 = \delta V \cdot x / l_{\text{gen}}$, таким образом, чтобы при $x = l_{\text{gen}}$ добавка к скорости δV_1 была равной δV .

Если скорость взрывной волны $V_{\text{вз в}}(x)$ будет изменяться при распространении вдоль боковой поверхности конуса в соответствии с законом, $V(x) = V_{\text{blast wave}} + \delta V$, $\delta V_1 = \delta V \cdot x / l_{\text{gen}}$, $\delta V = [r^2 - (r^2 - l_{\text{gen}}^2 \cdot \sin^2\Theta)]^{1/2} / \cos\Theta \cdot t_{\text{lat}}$, то время прихода звуковой волны (фронта взрывной волны), в точку O , будет одним и тем же для всех точек, расположенных на боковой поверхности конуса.

Изменять скорость распространения взрывной волны вдоль боковой поверхности конуса, можно шагом и радиусом намотки спирали, в соответствии с формулой (2).

10. Фокусное расстояние

Если скорость распространения звуковой волны вдоль высоты конуса с углом раствора при вершине, равным: $\Theta_{\text{plane front } 2} = 45^\circ$, будет меньше скорости взрывной волны, распространяющейся вдоль оси спирали по боковой поверхности конуса, то в основании конуса образуется вогнутый фронт звуковой волны.

Сделаем поперечное сечение конуса, получим треугольник. Обозначим точками A и C точки, лежащие

в основании треугольника, а точкой В, его вершину. Точка D пусть лежит на пересечении основания треугольника с его высотой, тогда, точка E, лежащая на одной и той же окружности радиуса r , что и точки А и С, находится внутри треугольника ABC. Обозначим величиной a расстояние ED – разницу между плоским и вогнутым фронтом на оси, величиной b расстояние AD – половину ширины основания конуса. Точкой O обозначим центр окружности радиуса r , проходящей через точки AED, угол AOE обозначим величиной θ' .

Тогда: $(r-a)/r = \sin\theta'$, $b/r = \cos\theta'$, запишем тождество: $\sin^2\theta' + \cos^2\theta' = 1$, в виде:

$$(r-a)^2/r^2 + b^2/r^2 = 1, \quad (17)$$

откуда найдем радиус окружности:

$$r = (a^2 + b^2)/2a, \quad (18)$$

и, учитывая, что $a \ll b$, получим:

$$r \approx b^2/2a. \quad (19)$$

Так, если необходимо сфокусировать взрывную волну на расстоянии $r = 20$ km, для $b = D_{\text{cone}}/2 = 75$ m, необходимо будет выдержать:

$$a = b^2/r \approx 0.3 \text{ m}.$$

Давление в фокусе такой сходящейся звуковой волны будет, по крайней мере не меньше, чем давление на фронте плоской звуковой волны: $P > 2 \text{ atm}$.

Время, за которое взрывная волна распространится от конуса на расстояние $r = 20$ km, составит чуть больше 13 с.

11. Выводы

Таким образом, в работе показано, что если расположить детонационный шнур в виде спирали с переменными шагом и радиусом намотки, то можно регулировать скорость распространения взрывной волны вдоль оси спирали, изменяя как шаг, так и радиус намотки спирали. Если расположить такие спирали по боковой поверхности конуса, то в направлении его оси скорость распространения взрывной волны будет различна в одном и том же поперечном сечении на оси и на образующей конуса. Изменением шага намотки спирали и радиуса намотки можно добиться того, что вдоль оси конуса взрывная волна будет распространяться медленнее, чем вдоль образующей, в результате чего можно сформировать вогнутый фронт взрывной волны.

От всех участков фронта скачок давления в точку фокуса придет одновременно, то есть когерентно, что приведет к значительному увеличению давления по сравнению со случаем выпуклого фронта взрывной волны.

Литература

1. Направленные взрывы, взрывы в одной среде и воде по типу цунами, взрывы и ударные волны на границе двух сред. Опасные волновые и колебательные процессы в сплошных средах [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.jewellery.org.ua/stones/games903.htm>
2. Кумулятивный эффект [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/?title=Кумулятивный_эффект
3. S. N. Dolya, Concentrator of elastic waves [Electronic resource] / Available at: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1410/1410.5537.pdf>
4. Чейс, В. Г. Взрывающиеся проволоки [Текст] / В. Г. Чейс // УФН. – 1965. – Т. 85, Вып. 2. – С. 381.
5. Русских, А. Г. Исследование электрического взрыва проводников в зоне высокого давления сходящейся ударной волны [Текст] / А. Г. Русских, В. И. Орешкин, А. Ю. Лабеецкий, С. А. Чайковский, А. В. Шишлов // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, Вып. 5. – С. 35–40. – Режим доступа: <http://journals.ioffe.ru/jtf/2007/05/p35-40.pdf>
6. Patent of the Russian Federation. Method of creation of directed explosion [Text] / Dolya S. N., Dolya S. S. – № 2498199, Date of publication: 10.11.2013, Bull. 31
7. Андреева, И. Б. Акустика океана [Электронный ресурс] / И. Б. Андреева, Л. М. Бреховских. – Режим доступа: http://www.akin.ru/spravka/s_ocean.htm
8. Dolya, S. N. Gas- dynamic acceleration of bodies till the hyper sonic velocity [Electronic resource] / S. N. Dolya. – Available at: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1403/1403.4541.pdf>
9. Таблицы физических величин [Текст]: справочник / под ред. И. К. Кикоина. – Москва, Атомиздат, 1976. – 1008 с.
10. Гексоген [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Гексоген>