

УДК 539.63

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-150-154

ЭВОЛЮЦИЯ СХОДЯЩЕГОСЯ СФЕРИЧЕСКОГО УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИМПУЛЬСА

Бугримов А.Л.¹, Лаврентьев В.В.², Родэ С.В.¹, Шапкарин И.П.¹

¹ *Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)*

117997, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1, Российская Федерация

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Российская Федерация*

Аннотация. Предложена модель эволюции сферического сходящегося ударно-волнового импульса в рамках требования постоянства количества движения материала, вовлечённого в движения импульсом пилообразной формы.

Ключевые слова: ударная волна, импульс, количество движения.

EVOLUTION OF A CONVERGING SPHERICAL SHOCK-WAVE PULSE

A. Bugrimov¹, V. Lavrent'ev², S. Rode¹, I. Shapkarin¹

¹ *Kosygin State University of Russia*

ul. Sadovnicheskaya 33, stroenie 1, 117997 Moscow, Russian Federation

² *Lomonosov Moscow State University*

Leninskie Gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation

Abstract. A model for the evolution of a spherical converging shock-wave pulse is proposed within the framework of the requirement of a constant amount of material movement involved in a saw-like pulse movement.

Key words: shock wave, pulse, amount of movement.

Эволюция ударно-волнового импульса (УВ-импульса) пилообразной формы рассмотрена в [1]. Показано, что при $t \rightarrow \infty$ амплитуда импульса затухает как $\sim 1/t$. При этом длина основания импульса считается неизменной.

Учёт затухания и «расплывания» импульса осуществлён в работах [2; 3] методом наложения двух процессов: распространения скачка уплотнения ступенчатой формы и «преследования» этого скачка волной разряжения.

В [4] предложена модель эволюции плоского и сферического УВ-импульса, базирующаяся на требовании постоянства количества движения вещества в УВ-импульсе.

В настоящей работе на основе подходов, используемых в [4], рассматривается сферический сходящийся УВ-импульс пилообразной формы. Как и в [4], принимается следующее.

1. Скорость фронта ударной волны (УВ):

$$D = c_0 + D_Z Z_\Phi. \quad (1)$$

где Z_Φ – значение параметра Z на фронте УВ. Если в качестве Z берётся массовая скорость, то соотношение (1) является просто ударной адиабатой.

2. Массовая скорость за фронтом УВ:

$$u = u_Z Z. \quad (2)$$

3. Волна сжатия имеет пилообразную форму, определяемую в начальный момент времени соотношениями:

$$Z = Bx, 0 \leq x \leq L, Z_\Phi = BL, \quad (3)$$

а в момент времени t – соотношениями:

$$Z = B\beta(t)x, 0 \leq x \leq L\lambda(t), Z_\Phi = B\beta(t)L\lambda(t). \quad (4)$$

4. Плотность материала в УВ-импульсе:

$$\rho = \rho_0 (1 + \rho_Z Z). \quad (5)$$

Ударно-волновой сферический импульс формируется на расстоянии X_0 от центра. Начальная длина импульса L . Направление движения импульса – к центру (рис. 1).

В соотношениях (1) – (5) c_0 – скорость звука в невозмущённом материале, плотность которого ρ_0 ; D_Z , u_Z , ρ_Z – постоянные, определяемые уравнением состояния вещества; B – постоянная, определяющая форму УВ-импульса в начальный момент времени; $0 \leq \beta(t) \leq 1$ – функция, определяющая затухание УВ-импульса, $\beta(0) = 1$; L – длина импульса в начальный момент времени; $1 \leq \lambda(t)$ – функция, определяющая «расплывание» импульса, $\lambda(0) = 1$.

Количество движения вещества в УВ-импульсе в выбранной системе координат определяется интегрированием по переменному объёму и является величиной постоянной. Требование жесткое, не учитывающее потери на разогрев, а потому значения параметров на фронте УВ-импульса следует ожидать завышенными.

В рамках задачи принимается:

$$P(t) = \iiint_{V(t)} \rho u dV = \iiint_{V(0)} \rho u dV = P(0) \quad (6)$$

Поэтому, во-первых (рис. 2):

$$\begin{aligned}
 P(0) &= 4\pi \int_{X_0}^{X_0+L} \rho_0 [1 + \rho_z B \beta(t)(X_0 + L - x)] u_z B \beta(t)(X_0 + L - x) x^2 dx = \\
 &= 4\pi \int_0^L \rho_0 [1 + \rho_z B(L - x)] u_z B(L - x)(x + X_0)^2 dx.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Простым, но достаточно информативным является случай $X_0 = L$. Этот подход может быть вполне оправданным, если принять во внимание порождение импульса детонацией взрывчатого вещества со скоростью детонации порядка $\sim 5 \times 10^3$ м/с. В этом случае речь может идти о радиусах $R_0 \sim 5$ см.

Поэтому

$$P(0) = 4\pi \rho_0 u_z B \left(\frac{11}{12} L^4 + \rho_z B \frac{8}{15} L^5 \right) \quad (8)$$

При таком условии

$$\begin{aligned}
 P(t) &= 4\pi \int_0^{L\lambda(t)} \rho_0 [1 + \rho_z B \beta(t)(L\lambda(t) - x)] u_z B \beta(t)(L\lambda(t) - x) x^2 dx = \\
 &= P(t) = 4\pi \rho_0 u_z B \beta(t) \left(\frac{1}{12} L^4 \lambda(t)^4 + \rho_z B \beta(t) \frac{1}{30} L^5 \lambda(t)^5 \right)
 \end{aligned} \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует:

$$\begin{cases} \beta(t) \lambda(t)^4 = 11, \\ \beta(t)^2 \lambda(t)^5 = 16, \end{cases}$$

и

$$\lambda(t) \approx 1,96, \beta(t) \approx 0,74. \quad (10)$$

Таким образом, согласно изложенному подходу, при движении к центру сферический УВ-импульс, во-первых, расплывается, во-вторых – затухает. Для практических ситуаций затухание составляет порядка 0,74 применительно к длине УВ-импульса.

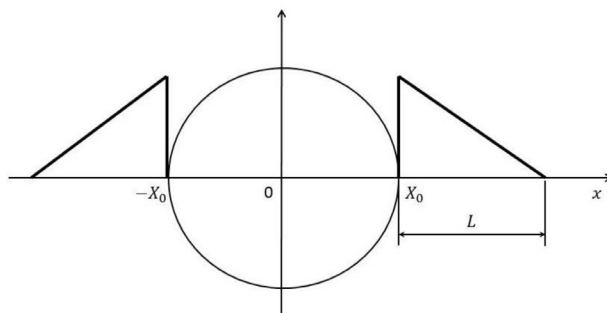


Рис. 1. Начальное положение УВ-импульса.

Родэ Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: rode-s-v@mail.ru;

Шапкарин Игорь Петрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: shapkarin-igor@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy L. Bugrimov – Doctor in Engineering Sciences, professor, Head of the Department of Physics, Kosygin State University of Russia;
e-mail: bugrimov-al@rguk.ru;

Victor V. Lavrent'ev – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Researcher at the Laboratory of Statistical Analysis, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University;
e-mail: lavrent@cs.msu.ru;

Sergey V. Rode – Doctor in Engineering Sciences, Professor at the Department of Physics, Kosygin State University of Russia;
e-mail: rode-s-v@mail.ru;

Igor P. Shapkarin – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Physics, Kosygin State University of Russia;
e-mail: shapkarin-igor@yandex.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Бугримов А.Л., Лаврентьев В.В., Родэ С.В., Шапкарин И.П. Эволюция сходящегося сферического ударно-волнового импульса // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2018. № 4. С. 150–154.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-150-154

FOR CITATION

Bugrimov A.L., Lavrent'ev V.V., Rode S.V., Shapkarin I.P. Evolution of a converging spherical shock-wave pulse. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 4, pp. 150–154.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-150-154