

Г. Т. Володин, Д. С. Кочергин

## ИМПУЛЬСНАЯ НАГРУЗКА НА НЕПОДВИЖНУЮ ПРЕГРАДУ ПРИ ВЗРЫВЕ В ВОДЕ

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

**Аннотация.** С использованием экспериментальных данных о взрывах в воде найдена аналитическая зависимость распределения удельного импульса взрывной нагрузки по длине балки. Учтены эффекты отражения возмущенного потока воды от поверхности преграды, глубина ее расположения в водоёме, взаимное расположение сферического заряда ВВ и преграды в воде, физические характеристики заряда.

**Ключевые слова:** импульсная нагрузка, взрыв в воде, эффекты отражения, распределение импульсной нагрузки по поверхности преграды.

DOI: 10.37972/chgpu.2021.49.3.002

УДК: 531/534

### Введение

Значительный интерес в расчетах конструкций на действие взрыва в воде представляет задача о нахождении распределения удельного импульса взрывной нагрузки по длине балки, поскольку её решение позволяет найти условия гарантированного разрушения балочной конструкции.

Сначала рассмотрим задачу о нахождении давления, действующего возмущенного потока жидкости (воды) на балку (давления торможения). Пусть к балке под некоторым углом  $\alpha$  подходит параллельно-струйный или расходящийся поток возмущенной среды (воды). На рис. 1 показан момент подхода к точке  $A$  такого потока, образованного при взрыве сферического заряда радиуса  $r_0$ . Чтобы найти давление, которое создает в этой точке водный поток при его торможении, вырежем мысленно в окрестности точки  $A$  бесконечно малую площадку  $dS$  и рассмотрим действие на нее частиц потока (рис.2).

---

© Володин Г.Т., Кочергин Д. С., 2021

*Володин Геннадий Тимофеевич*

e-mail: g.volodin@yandex.ru, доктор технических наук, профессор, Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

*Кочергин Денис Сергеевич*

e-mail: sig.cod4@yandex.ru, аспирант, Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

Поступила 04.10.2021

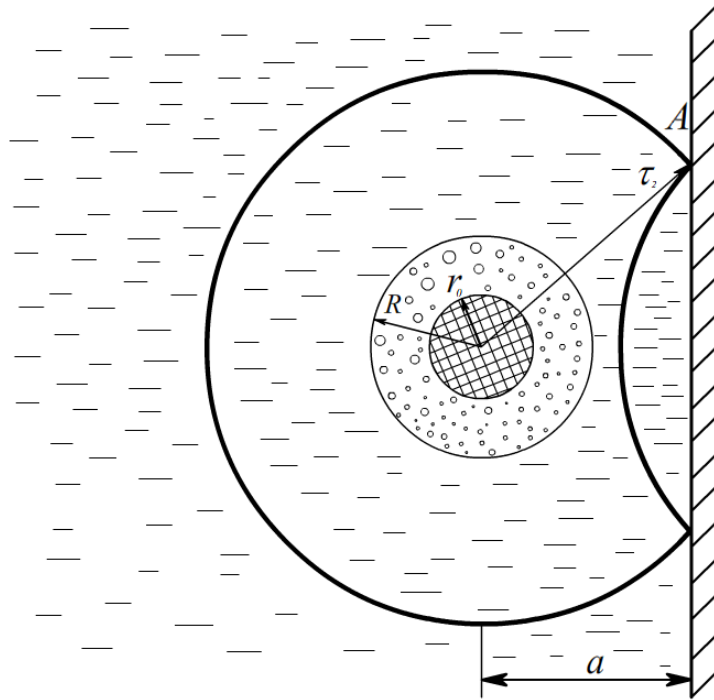


Рис. 1 Схема движения элемента балки под действием импульсной нагрузки

На площадку падает бесконечно малая струйка возмущенной водной среды, площадь поперечного сечения которой  $dS \cdot \cos \alpha$ . За бесконечно малый промежуток времени  $dt$  к площадке  $dS$  подойдёт масса воды, заключенная в элементарной струйке между площадкой  $dS$  и сечением струйки, удаленным на расстояние  $u_2 dt \cdot \cos \alpha$ , где  $u_2$  – скорость потока на фронте УВ в воде. Эта масса определяется соотношением

$$dm = \rho_2 dS u_2 dt \cos \alpha \quad (1)$$

где  $\rho_2$  – плотность воды в падающей струйке на фронте УВ.

При ударе элементарной струйки о преграду частицы потока, теряя часть нормальной составляющей скорости, отражаются от преграды под некоторым углом  $\beta \neq \alpha$ . Обозначим нормальную составляющую скорости подходящего к преграде потока  $u_{2n}$ , а нормальную составляющую скорости отраженного потока  $u'_{2n}$  и применим к элементарной струйке закон сохранения импульса. Согласно этому закону, импульс силы, действующий на площадку  $dS$ , равен изменению количества движения струйки, следовательно

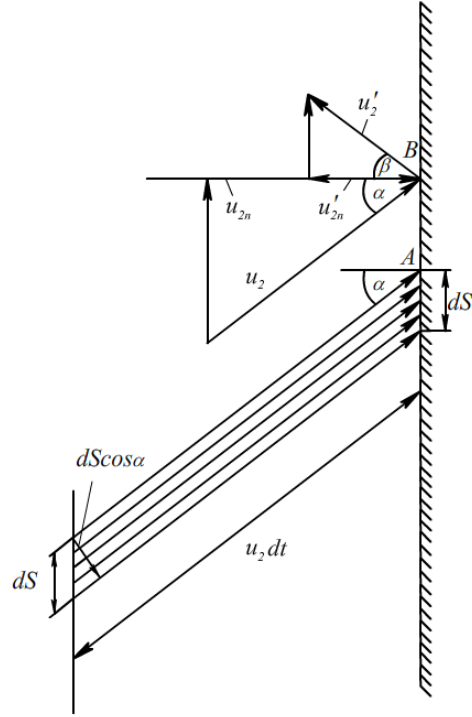
$$P_m dS \cdot dt = dm \cdot (u_{2n} - u'_{2n}), \quad (2)$$

где  $P_m$  – максимальное давление при ударе.

С учетом соотношения (1) для элементарной массы  $dm$ , из выражения (2) найдем

$$P_m = u_2 \cos \alpha \cdot \rho_2 \cdot u_{2n} \left( 1 - \frac{u'_{2n}}{u_{2n}} \right) \quad (3)$$

Отношение модуля нормальной составляющей скорости отраженного потока к модулю нормальной составляющей падающего потока есть коэффициент восстановления при

Рис. 2 Схема для определения давления  $P_m$ 

ударе

$$K = \frac{|u'_{2n}|}{|u_{2n}|} \quad (4)$$

Так как  $u'_{2n}$  и  $u_{2n}$  имеют противоположные направления, то

$$1 - \frac{u'_{2n}}{u_{2n}} = 1 + K \quad (5)$$

Согласно рис. 2  $u_{2n} = u_2 \cos \alpha$ , следовательно

$$P_m = (1 + K) \rho_2 u_2^2 \cos^2 \alpha \quad (6)$$

Согласно экспериментальным данным в работе [1] получен алгоритм вычислений

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= 1 - \left( \frac{P_2 - P_{01}}{BP_{01}} + 1 \right)^{-\frac{1}{n}} \\ D &= \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{\varepsilon \rho_1}} \\ u_2 &= \varepsilon D \\ \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{1}{1 - \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

определяющий параметры на фронте УВ по известному давлению на фронте. Это давление определяется по экспериментальным зависимостям [1], [2], [3], [4]:

$$\frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} = 14700 \left( \frac{r_0}{a} \right)^{1,13}, \quad (8)$$

справедливым для сферических зарядов на расстояниях  $\frac{r}{r_0} > 12$ , и

$$\frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} = 37000 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

если  $6 < \frac{r}{r_0} < 12$ .

В вычислениях по формулам (7) используются соотношения для параметров  $B$  и  $n$  в виде

$$B = \begin{cases} 2945, & \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} < 3 \cdot 10^4 \\ 4115, & \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} \geq 3 \cdot 10^4 \end{cases} \quad (10)$$

$$n = \begin{cases} 7, 15, & \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} < 3 \cdot 10^4 \\ 6, 29, & \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} \geq 3 \cdot 10^4 \end{cases}$$

В приведенных формулах  $P_{01}$  – давление воды на поверхности водоема,  $P_1$  – давление воды на глубине  $H$ ; эти величины связаны соотношением

$$P_1 = P_{01} + \rho_1 g H \quad (11)$$

где  $\rho_1$  – плотность воды в невозмущенном состоянии,  $g$  – ускорение силы тяжести. Спад давления с течением времени принято [1], [5], [6] определять формулой

$$\frac{P - P_{01}}{P_{01}} = \frac{P_m - P_{01}}{P_{01}} \cdot e^{-\frac{t}{\vartheta}} \quad (12)$$

в которой время  $t$  отсчитывается от момента прихода фронта ударной волны в данную точку пространства, а величина  $\vartheta$ , называемая постоянной времени, определяется из соотношения [1], [4]

$$\frac{a_{01} \vartheta}{r_0} = 1,4 \cdot \left( \frac{a}{r_0} \right)^{0,24} \quad (13)$$

где  $a_{01}$  – скорость звука в воде на поверхности водоема (например, при  $T = 288^\circ K$ ,  $a_{01} = 1460 \frac{m}{c}$ ).

Удельный импульс фазы сжатия определяется формулой [1]

$$i = \int_0^{\tau_+} (P - P_{01}) dt = (P_m - P_{01}) \int_0^{\tau_+} e^{-\frac{t}{\vartheta}} dt = (P_m - P_{01}) \vartheta \left( 1 - e^{-\frac{\tau_+}{\vartheta}} \right)$$

В неограниченной среде  $\frac{\tau_+}{\vartheta} > 5$  [1], поэтому

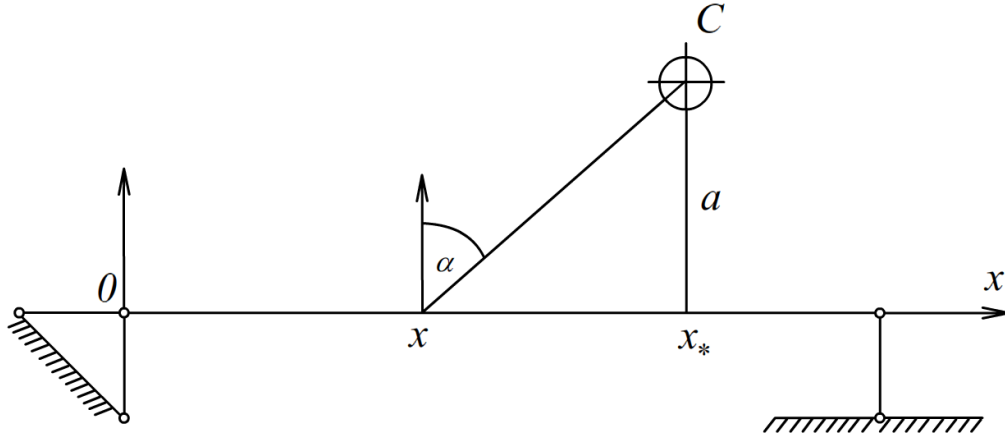
$$i = (P_m - P_{01}) \vartheta \quad (14)$$

Таким образом, удельный импульс, действующий на преграду, определяется формулой (14), где  $P_m$  находится из соотношения (6), т.е.

$$i = [(1 + K) \rho_2 u_2^2 \cos^2 \alpha - P_{01}] \vartheta \quad (15)$$

Преобразуем формулу (15), расположив начало координат в левом конце балки (Рис. 3)

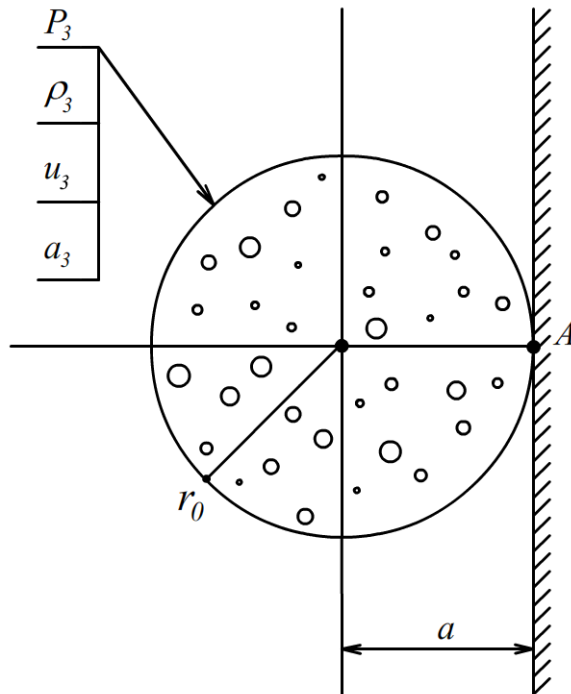
Пусть  $x$  – координата точки падения элементарной струйки потока,  $\alpha$  – угол падения,  $x_*$  – координата проекции заряда  $C$  на ось балки (эпицентр взрыва). Учитывая

Рис. 3 Схема для определения удельного импульса  $i$ .

соотношения  $x_* - x = atg\alpha$ ;  $\cos^2 \alpha = \frac{1}{1+tg^2\alpha} = \frac{a^2}{(x_* - x)^2 + a^2}$ , формулу (15) для удельного импульса представим в виде

$$i = \left[ (1 + K)\rho_2 u_2^2 \frac{a^2}{(x_* - x)^2 + a^2} - P_{01} \right] \vartheta \quad (16)$$

Найдём теперь величину коэффициента восстановления  $K$ . Для этого рассмотрим случай, когда заряд контактирует в точке  $A$  с преградой (балкой) (рис.4).

Рис. 4 Схема расположения заряда для определения величины  $K$

Обозначения  $P_3, \rho_3, u_3, a_3$  соответствуют давлению, плотности, скорости частиц и скорости звука на фронте детонационной волны. Эти величины определяются соотношениями [1]:

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= \frac{D_0}{K_3 + 1} \\ \rho_3 &= \frac{K_3 + 1}{K_3} \rho_0 \\ P_3 &= \frac{\rho_0 D_0^2}{K_3 + 1} \\ a_3 &= \frac{K_3 D_0}{K_3 + 1} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где  $\rho_0$  - плотность заряда ВВ,  $D_0$  - скорость детонации заряда,  $K_3$  - показатель политропы на фронте детонационной волны. В рассматриваемом случае контактного расположения заряда в формуле (6) следует положить:  $\alpha = 0, P_m = P_3, \rho_2 = \rho_3, u_2 = u_3$  и, для определения  $K$ , получим соотношение

$$P_3 = (1 + K) \rho_3 u_3^2; \quad (18)$$

отсюда следует

$$K = \frac{P_3}{\rho_3 u_3^2} - 1 \quad (19)$$

С учётом (19) формулу (16) представим в виде

$$i = \left[ P_3 \left( \frac{\rho_2 u_2}{\rho_3 u_3} \right)^2 \frac{a^2}{a^2 + (x_* - x)^2} - P_{01} \right] \vartheta, \quad (20)$$

Погонный импульс вычисляется по формуле

$$i_* = b K_1 i,$$

где  $K_1$  - коэффициент формы,  $b$  - ширина балки [1], [3].

Для балки прямоугольного поперечного сечения  $b \times h$ , где  $h$  - высота сечения,  $K_1 = 1$ .

**Заключение.** Найденная формула (20) для удельного импульса, воспринимаемого преградой (балкой), определяет его как функцию координаты точки падения (т.е. импульс распределен по длине балки  $i_* = i_*(x)$ ). Эта функция включает определяющие параметры созданного взрывом силового поля: величину  $C$  массы заряда ВВ (входит в формулу массы через радиус заряда), характеристики ВВ заряда, расположение заряда в воде на глубине  $H$  и на удалении  $a$  от преграды (балки), положение эпицентра взрыва  $x_*$ . Полученное соотношение (20) для погонного импульса позволяет отыскивать условия гарантированного разрушения элементов конструкций (в рассматриваемом случае - балки) импульсной взрывной нагрузкой в воде. Влияние свойств источника взрыва может быть учтено привлечением экспериментальных данных [5, 6].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Саламахин Т. М. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок. Москва: ВИА, 1974. 255 с.
- [2] Коул Р. Г. Подводные взрывы. Москва: ИЛ, 1950. 495 с.
- [3] Христофоров Б. Д. Влияние свойств источника на действие взрыва в воздухе и воде. Физика горения и взрыва, 2004. 115-118 с.

- [4] Кедринский В. К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: СО РАН, 2000.
- [5] Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Москва: Судостроение, 1967. 194 с.
- [6] Володин Г. Т. Действие взрыва зарядов конденсированного ВВ в газовой и жидкой средах. Часть 2. Взрывостойкость и гарантированное разрушение элементов конструкций. Тула: Левша, 2005. 160 с.

*G. T. Volodin, D. S. Kochergin*

## PULSE LOAD ON A STATIONARY BARRIER DURING AN EXPLOSION IN WATER

*Tula State University, Tula, Russia.*

**Abstract.** Using experimental data on explosions in water, an analytical dependence of the distribution of the specific impulse of the explosive load along the length of the beam is found. The effects of reflection of the disturbed water flow from the barrier surface, the depth of its location in the reservoir, the mutual location of the spherical explosive charge and the barrier in the water, the physical characteristics of the charge are taken into account.

**Keywords:** pulse load, explosion in water, reflection effects, pulse load distribution over the barrier surface.

### REFERENCES

- [1] Salamakhin T. M. Physical foundations of the mechanical action of an explosion and methods for determining explosive loads. Moscow: VIA, 1974. 255 p. (in Russian).
- [2] Cole R. G. Underwater explosions. Moscow: IL, 1950. 495 p. (in Russian).
- [3] Khristoforov B. D. Influence of source properties on the effect of an explosion in air and water. Tula: Physics of gorenje and explosion, 2004. 115-118 p. (in Russian).
- [4] Kedrinsky V. K. Hydrodynamics of explosion: experiment and models. Novosibirsk: SB RAS, 2000. (in Russian).
- [5] Zamyshlyaev B. V., Yakovlev Y. S. Dynamic loads during an underwater explosion. Moscow: Shipbuilding, 1967. 194 p. (in Russian).
- [6] Volodin G. T. The effect of the explosive charges in gas and liquid media. Part 2. Explosion resistance and guaranteed destruction of structural elements. Tula: Lefty, 2005. 160 p. (in Russian).

---

*Volodin Gennady Timofeevich*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tula State University, Tula, Russia.

*Kochergin Denis Sergeevich*, postgraduate student, Tula State University, Tula, Russia.