

Г. Т. Володин, Д. С. Кочергин

О ПРОБЛЕМЕ ГАРАНТИРОВАННОГО РАЗРУШЕНИЯ ВЗРЫВОМ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ВОДЕ

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Аннотация. Найден условия гарантированного разрушения балки в воде взрывом заряда конденсированного ВВ. Под гарантированным разрушением балки понимается нарушение ее несущей способности вследствие появления в ней трещин, сколов, ведущих при дальнейших колебаниях к недопустимым по величине максимальным прогибам, разделением её на фрагменты, соскакиванием с опор. Учтены эффекты сжимаемости воды; её влияние на движение балки под действием импульсной нагрузки взрыва учитывается введением присоединенной массы, учитывается глубина погружения балки и заряда от поверхности водоёма, расположение заряда относительно балки, эффекты отражения ударной волны от поверхности балки, геометрические и физические характеристики заряда ВВ.

Ключевые слова: взрыв заряда конденсированного ВВ, разрушение балки на опорах в воде, ударная волна, отражение, глубина погружения, сжимаемость воды.

DOI: 10.37972/chgpu.2021.50.4.007

УДК: 531/534

Постановка задачи.

Физическая модель (основные допущения). Рассматривается балка длиной l с прямолинейной до деформации линией прогибов, свободно опертая по концам на недеформируемых неподвижных опорах. Балка расположена в воде на глубине H , имеет прямоугольное поперечное сечение $b \times h$, где b – ширина, h – высота сечения. Балка изготовлена из упругого изотропного материала.

Заряд конденсированного ВВ является сферическим некоторого радиуса r_0 ; физические характеристики заряда предполагаются известными (плотность ВВ, скорость детонации, удельная энергия взрывного превращения – калорийность). Заряд расположен на расстоянии r_* от оси балки в произвольной точке её пролёта, то есть имеет координаты (x_*, r_*) в системе координат xOw , где x_* – точка пролёта балки – эпицентр взрыва. (Рис.1).

© 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: sir.cod4@yandex.ru, аспирант, Тульский государственный университет, г. Тула, Россия.

Поступила 30.11.2021

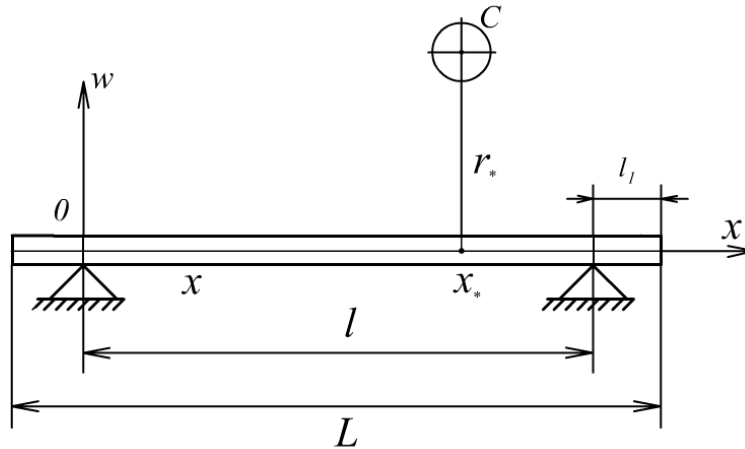


Рис. 1 Схема расположения заряда над балкой

Предполагается, что изначально (до действия взрывной нагрузки) балка надежно лежит на опорах; при этом, как известно [1], [2], [3], для надежного опирания свободно опертых балок их свободные концы должны иметь длину $\frac{l_1}{2}$, удовлетворяющую соотношению

$$\frac{l_1}{h} \geq \frac{4}{3} \quad (1)$$

Максимальное давление, формирующее удельный импульс взрывной нагрузки, определяется с учетом эффектов отражения ударной волны, распространяющейся в воде, от поверхности балки. Снято распространенное в исследованиях предположение о несжимаемости воды, использованы динамические адиабаты воды в соответствующих диапазонах давлений.

В решении проблемы разрушения взрывом элементов конструкций возможны два взаимно противоположных подхода [1], [4]. Первый подход: при фиксированном расстоянии r_* заряда ВВ от элемента конструкции найти минимальную массу заряда, взрыв которого гарантированно разрушит этот элемент конструкции. Второй подход: при фиксированной массе заряда ВВ определенного типа найти максимальное расстояние этого заряда от элемента конструкции для фиксированного эпицентра взрыва, приводящее на этом и меньших расстояниях к гарантированному разрушению элемента конструкции. В данном исследовании использован первый подход.

Математическая модель и решение задачи.

Рассматривается взрыв сферического заряда радиуса r_0 конденсированного ВВ в воде, заряд неконтактный, детонация мгновенная [1], [4]. Вода представлена сжимаемой средой с уравнением состояния Тэта [5], [6], [7], [8] и различными значениями констант, входящих в это уравнение в зависимости от величин относительных давлений в волне; используются соотношения представленной выше физической модели рассматриваемого явления.

Найдём сначала максимальное давление, формирующее удельный импульс взрывной нагрузки. Таким давлением является давление отражения после встречи ударной волны взрыва с поверхностью преграды (в данном случае с поверхностью балки).

Рассмотрим нормальное отражение ударной волны в воде. Для отраженной ударной волны в непосредственной близости у поверхности балки, скорость среды в отраженной волне на фронте вследствие неподвижности преграды равна нулю [5], [6] и уравнения неразрывности и количества движения примут вид [6]

$$\left. \begin{aligned} \rho_2(D_3 + w_2) &= \rho_3 D_3 \\ \rho_2(D_3 + w_2)^2 - \rho_3 D_3^2 &= P_3 - P_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где ρ_2 и ρ_3 – соответственно плотность среды на фронте падающей и отраженной ударных волн, w_2 и $w_3 = 0$ – скорости среды в падающей и отраженной волне на фронте, D_3 – скорость фронта отраженной ударной волны, P_2 и P_3 – давления на фронте падающей и отраженной ударных волн.

Используем динамическую адиабату [1]

$$\frac{P_3 - P_{01}}{P_{01}} = A \left[\left(\frac{\rho_3}{\rho_{01}} \right)^\alpha - 1 \right], \quad (3)$$

где значения констант соответствуют диапазонам давлений: для давлений в интервале

$$1 < \frac{P}{P_{01}} \leq 3 \cdot 10^4 \quad (4)$$

значения $A = 2945$; $\alpha = 7, 15$; если

$$\frac{P}{P_{01}} > 3 \cdot 10^4 \quad (5)$$

значения $A = 4115$; $\alpha = 6, 29$.

Величины ρ_{01} и P_{01} соответствуют плотности и давлению воды на поверхности водоёма. Из второго уравнения системы (2) найдем давление

$$P_3 = P_2 + \frac{\rho_2^2 w_2^2}{\rho_3 - \rho_2} + \rho_2 w_2^2 \quad (6)$$

Из первого уравнения системы (2) найдем D_3 в виде

$$D_3 = \frac{\rho_2 w_2}{\rho_3 - \rho_2} \quad (7)$$

Сравнивая соотношения (3) и (6), получим трансцендентное уравнение для определения ρ_3 в воде

$$Ax^\alpha - a_2 \frac{x}{x - a_3} + b = 0, \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\rho_3}{\rho_{01}}; \quad a_1 = \frac{P_2}{P_{01}}; \quad a_2 = \frac{\rho_2 a_2^2}{P_{01}}; \\ a_3 &= \frac{\rho_2}{\rho_{01}}; \quad b = 1 - A - a_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

После нахождения величины ρ_3 из уравнения (5) по соотношению (6) с учётом $w_3 = 0$ определим искомое давление отражения P_3 у преграды.

Из соотношений (6) и (8) видно, что для нахождения решения уравнения (8), а затем давления P_3 в отраженной волне у поверхности балки необходимо знать параметры P_2, ρ_2, w_2 на фронте падающей ударной волны.

Для установления зависимостей между параметрами на фронте падающей УВ в воде от взрыва заряда ВВ следует использовать интегральные законы сохранения массы, импульса и энергии, которые приводят к уравнениям [5]

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \varepsilon D_2 \\ P_2 - P_{01} &= \rho_{01} \varepsilon D_2^2 \\ \varepsilon &= 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где ε – относительная объёмная деформация воды на фронте ударной волны, при этом плотность невозмущенной среды (воды) $\rho_1 = \rho_{01}$, то есть практически мало отличается от плотности на любой глубине H водоёма.

Уравнения системы (10) представляют соответственно формулировки законов сохранения массы и импульса при переходе через фронт ударной волны. Уравнение, формирующее интегральный закон сохранения энергии, не может быть привлечено, так как в него входит дополнительная неизвестная величина – внутренняя энергия, неопределяемая для воды через давление и плотность [1]. Вместо этого уравнения для воды, как указывалось выше, можно привлечь уравнения динамических адиабат (4), (5), из которых следует дополнительное уравнение

$$\frac{\rho_2}{\rho_{01}} = \left(\frac{P_2 - P_{01}}{AP_{01}} + 1 \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (11)$$

Вводя относительную деформацию, получим

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{P_2 - P_{01}}{AP_{01}} + 1 \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (12)$$

Сгруппировав привлекаемые уравнения в единую систему, получим алгоритм [5]

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= 1 - \left(\frac{P_2 - P_{01}}{AP_{01}} + 1 \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \\ D_2 &= \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{\varepsilon \rho_1}} \\ u_2 &= \varepsilon D_2 \\ \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{1}{1 - \varepsilon} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

определяющий параметры на фронте ударной волны по известному давлению на фронте. Это давление находится по экспериментальным зависимостям, для сферических зарядов в виде соотношения

$$\frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} = 14700 \left(\frac{r_0}{r_*} \right)^{1,13} \quad (14)$$

для расстояний, удовлетворяющих соотношению

$$\frac{r_*}{r_0} > 12, \quad (15)$$

где r_0 радиус заряда ВВ, r_* расстояние от центра взрыва до балки. Для сосредоточенных (сферических) зарядов на расстояниях

$$6 < \frac{r_*}{r_0} \leq 12 \quad (16)$$

давление на фронте можно определять по формуле [5], [7]

$$\frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} = 37000 \left(\frac{r_0}{r_*} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

При вычислениях по алгоритму (13) следует положить [5]:

$$A = \begin{cases} 2945, & \text{если } \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} < 3 \cdot 10^4 \\ 4115, & \text{если } \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} \geq 3 \cdot 10^4 \end{cases} \\ \alpha = \begin{cases} 7, 15, & \text{если } \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} < 3 \cdot 10^4 \\ 6, 29, & \text{если } \frac{P_2 - P_{01}}{P_{01}} \geq 3 \cdot 10^4 \end{cases} \quad (18)$$

Следует также различать величины давлений P_1 и P_{01} , а именно: P_1 – давление жидкости в точке наблюдения на глубине H , P_{01} – давление на свободной поверхности воды, при этом

$$P_1 = P_{01} + \rho_1 g H \quad (19)$$

где g – ускорение силы тяжести.

Перейдём теперь к нахождению условий гарантированного разрушения рассматриваемой балки импульсной нагрузкой, определяемой максимальным давлением, созданным взрывом сферического заряда радиуса r_0 ВВ в воде на расстоянии r_* от оси балки.

Совместим ось абсцисс прямоугольной декартовой системы координат с осью балки, а начало координат расположим на её левом конце. Уравнение упругих колебаний балки под действием её внешней нагрузки в принятой системе координат для случая взрыва в воде с учетом введения присоединенной погонной массы воды m_{*1} в уравнение движения, запишем в виде [9]

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \beta^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{K_1 b}{m_* + m_{*1}} P_3(x) f(t), \quad (20)$$

где $w(x, t)$ – прогиб балки в её сечении с координатой x в момент времени t , $P_3(x)$ – максимальное давление на балку в момент приложения к ней импульсной нагрузки (в данном случае – давление отражения), b – ширина сечения балки, K_1 – коэффициент формы [10], m_* – погонная (на единицу длины) масса балки, $f(t)$ – функция времени, учитывающая спад давления. Эту функцию в большинстве случаев, согласно экспериментальным данным, принимают в виде [10]

$$f(t) = \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^n, \quad (21)$$

где τ – время действия фазы сжатия ударной волны, n – показатель степени, обычно принимаемый из интервала (1;3) в зависимости от интенсивности ударной волны; величина β определяется соотношением

$$\beta = \sqrt{\frac{EJ}{m_* + m_{*1}}} \quad (22)$$

Рассмотрим поведение балки под действием кратковременно действующего импульса, интенсивность которого по длине балки зависит от положения её сечения x , то есть

$$i(x) = K_1 b P_3(x) \int_0^\tau f(t) dt \quad (23)$$

Согласно экспериментальным данным, удобно в исследованиях ввести постоянную времени ϑ , определяемую соотношением

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

где a_{01} – скорость звука в воде на поверхности водоёма (например при температуре $T = 288^\circ K$, $a_{01} = 1460 \frac{m}{c}$). Тогда спад давления с течением времени следует определять соотношением [5], [6], [8], [10]:

$$\frac{P - P_{01}}{P_{01}} = \frac{P_3 - P_{01}}{P_{01}} \cdot e^{-\frac{t}{\vartheta}} \quad (25)$$

в котором время t отсчитывается от момента прихода фронта ударной волны в данную точку пространства.

Удельный импульс фазы сжатия определяется тогда соотношением

$$i = \int_0^{\tau_{\pm}} (P - P_{01}) dt = (P_3 - P_{01}) \int_0^{\tau_{\pm}} e^{-\frac{t}{\vartheta}} dt = (P_3 - P_{01}) \vartheta \left(1 - e^{-\frac{\tau_{\pm}}{\vartheta}}\right)$$

В неограниченной среде $\frac{\tau_{\pm}}{\vartheta} > 5$, поэтому

$$i = (P_3 - P_{01}) \vartheta \quad (26)$$

Так как импульс действует кратковременно, то за время его действия частицы балки не успевают получить заметных смещений, а получают только начальные скорости. Деформирование балки происходит после окончания действия нагрузки, то есть в период свободных колебаний, которые описываются однородным уравнением

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \beta^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad (27)$$

Краевые условия для уравнения (27) соответствуют условиям закрепления концов балки на опорах.

Для свободно опертой на концах балки на идеальные (недеформируемые) опоры, краевые условия для уравнения (27) примут вид

$$w(0, t) = w(l, t) = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{x=l} = 0, \quad (29)$$

где l – длина балки.

Условия (28) означает, что концы балки лишены возможности перемещаться по направлению оси w , а условия (29) означают, что концы балки неспособны воспринимать изгибающего момента.

Начальные условия для уравнения (27) соответствуют характеру действующей нагрузки [1], [4], [9]

$$\frac{\partial w}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{i_*(x)}{m_* + m_{*1}}, \quad (30)$$

где $i_*(x) = bK_1 i$ – погонный импульс [5].

В работе [10] найдено решение начально-краевой задачи (27)-(29) для случая расположения свободно опертой балки в воздухе. Для случая её расположения в воде

решение, согласно замечанию профессора Т.М. Саламахина [1], будет отличаться наличием в этом решении слагаемого m_{*1} , то есть вместо m_* будет фигурировать сумма $m_* + m_{*1}$. Это решение для случая расположения балки в воде имеет вид

$$w = \frac{2l}{\pi^2 \beta (m_* + m_{*1})} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} \sin j\pi \frac{x}{l} \sin \frac{j^2 \pi^2}{l^2} \beta t \int_0^l i_*(\xi) \sin \frac{j\pi \xi}{l} d\xi, \quad (31)$$

при этом $\beta = \sqrt{\frac{EJ}{m_* + m_{*1}}}$.

Условие гарантированного разрушения рассматриваемой балочной конструкции примем в виде [4]

$$M_{\max} \geq K_{0*} \mu_3 \delta_{*n} W_* \quad (32)$$

где μ_3 – коэффициент динамичности материала балки ($\mu_3 = \frac{\delta_{*3}}{\delta_*}$, δ_{*3} – динамический предел прочности, δ_* – статический предел прочности); K_{0*} – коэффициент однородности на гарантированное разрушение ($K_{0*} = \frac{\delta_{*\max}}{\delta_{*0}}$, δ_{*0} – нормированный браковочный минимум, $\delta_{*\max}$ – максимальное сопротивление материала); δ_{*n} – нормативное сопротивление материала при изгибе, W_* – момент сопротивления балки при изгибе. Используя формулу для максимального изгибающего момента M_{\max} для малых прогибов

$$M_{\max} = -EJ \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (33)$$

и найденное решение (31), получены соотношения между фиксированным расстоянием r_* расположения заряда ВВ над балкой и величиной этого заряда r_0 , определяющие эффект гарантированного разрушения рассматриваемой балочной конструкции.

Заключение. Полученные результаты исследований отличаются от результатов работы [9] методами нахождения давления отражения P_3 , однако их численные различия незначительные.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Саламахин Т. М. Действие взрыва на элементы конструкций. Москва: ВИА, 1969. 168 с.
- [2] Рабинович И. М. Основы строительной механики стержневых систем. Москва: Госстройиздат, 1960. 519 с.
- [3] Киселёв В. А. Строительная механика. Специальный курс (динамика и устойчивость сооружений). Москва: Стройиздат, 1980. 616 с.
- [4] Володин Г. Т. Действие взрыва зарядов конденсированных ВВ в газовой и жидких средах. Часть 2. Взрывостойкость и гарантированное разрушение элементов конструкций. Тула: Левша, 2005. 160 с.
- [5] Саламахин Т. М. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок. Москва: ВИА, 1974. 255 с.
- [6] Сунцов Н. Н. Основы теории подводного и воздушного взрыва. Ленинград: Б.и., 1956. 185 с.
- [7] Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Ленинград: Судостроение, 1967. 194 с.
- [8] Перцев А. К., Кадыров С. Г. Воздействие подводного взрыва на элементы корабля. Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2009. 321 с.
- [9] Володин Г. Т., Кочергин Д. С. Импульсная нагрузка на неподвижную преграду при взрыве в воде // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. № 3(49).
- [10] Саламахин Т. М. Разрушение взрывом элементов конструкций. Москва: ВИА, 1961. 275 с.

G. T. Volodin, D. S. Kochergin

ON THE PROBLEM OF GUARANTEED DESTRUCTION BY EXPLOSION OF STRUCTURAL ELEMENTS IN WATER

Tula State University, Tula, Russia.

Abstract. The conditions of guaranteed destruction of the beam in water by the explosion of a condensed explosive charge are found. Guaranteed destruction of a beam is understood as a violation of its bearing capacity due to the appearance of cracks, chips in it, leading to unacceptable maximum deflections, its separation into fragments, jumping off supports with further fluctuations. The effects of compressibility of water are taken into account; its effect on the movement of the beam under the action of the pulse load of the explosion is taken into account by the introduction of the attached mass, the depth of immersion of the beam and the charge from the surface of the reservoir, the location of the charge relative to the beam, the effects of shock wave reflection from the surface of the beam, geometric and physical characteristics of the explosive charge are taken into account.

Keywords: explosion of a condensed explosive charge, destruction of a beam on supports in water, shock wave, reflection, immersion depth, compressibility of water.

REFERENCES

- [1] Salamakhin T. M. Explosion effect on structural elements. Moscow: VIA, 1969. 168 p. (in Russian).
- [2] Rabinovich I. M. Fundamentals of structural mechanics of rod systems. Moscow: Gosstroyizdat, 1960. 519 p. (in Russian).
- [3] Kiselyov V. A. Construction mechanics. Special course (dynamics and stability of structures). Moscow: Stroyizdat, 1980. 616 p. (in Russian).
- [4] Volodin G. T. Action of explosion of charges of condensed explosives in gas and liquid media. Part 2. Explosion resistance and guaranteed destruction of structural elements. Tula: Lefty, 2005. 160 p. (in Russian).
- [5] 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).
- [6] Suntsov N. N. Fundamentals of the theory of underwater and air explosion. Leningrad: B.I., 1956. 185 p. (in Russian).
- [7] Zamyshlyayev B. V., Yakovlev Y. S. Dynamic loads during underwater explosion. Leningrad: Shipbuilding, 1967. 194 p. (in Russian).
- [8] Pertsev A. K., Kadyrov S. G. The impact of an underwater explosion on the elements of the ship. St. Petersburg: SPbGMTU, 2009. 321 p. (in Russian).
- [9] Volodin G. T., Kochergin D. S. Pulse load on a stationary barrier during an explosion in water // Vestnik of the I. Ya. Yakovlev ChSPU. Series: Mechanics of the limit state. 2021. no. 3(49). 12-18 p. (in Russian).
- [10] Salamakhin T. M. Explosion destruction of structural elements. Moscow: VIA, 1961. 275 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.