

Г. Т. Володин, Д. С. Кочергин

ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ ГАРАНТИРОВАННОГО РАЗРУШЕНИЯ ВЗРЫВОМ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ВОДЕ

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Аннотация. Представлено решение задач, определяющих процесс воздействия взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) на балку в воде. Отмечено, что этот процесс можно условно разделить на два этапа. На первом этапе происходит формирование импульсной нагрузки взрыва в воде; на втором этапе – воздействие этой нагрузки на элемент конструкции (или конструкцию в целом для соответствующей задачи). Для первого этапа впервые с применением экспериментальных данных получена аналитическая зависимость для удельного импульса от взрыва в воде сферического заряда с заданными физическими и геометрическими характеристиками. На втором этапе в результате решения соответствующей начально-краевой задачи получена зависимость смещения сечений балки для любого момента времени, позволяющая найти условия гарантированного разрушения балки в соответствии с выбранным критерием разрушения. В постановках и решениях соответствующих задач учтены: эффекты отражения возмущенного падающего потока воды от преграды (балки), глубина погружения конструкции и заряда в воду, физические и геометрические характеристики заряда и балки, а также их взаимное расположение в воде, вид закрепления балки на опорах. Отмечено существенное влияние указанных факторов на величину заряда, взрыв которого приводит рассматриваемую балку к её гарантированному разрушению.

Ключевые слова: взрыв в воде, гарантированное разрушение, импульсная нагрузка, критерий разрушения

DOI: 10.37972/chgpu.2022.52.2.007

УДК: 531/534

Первый этап. Эффекты отражения при взрыве в воде.

Пусть к преграде в точке A под некоторым углом α подходит параллельно-струйный или расходящийся поток возмущенной воды, образованный при взрыве в

© Володин Г. Т., Кочергин Д. С., 2022

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 17.07.2022

воде заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) сферической формы радиуса r_0 (Рис. 1). Преграда считается идеальной (недеформируемой) в момент воздействия на неё потока и отражения, а также неподвижной, так как за время действия нагрузки рассматриваемого вида элементы преграды не получают заметных смещений, а получают лишь начальные скорости. Деформирование преграды происходит после окончания действия нагрузки, во время свободных колебаний преграды [1], [2]. Форма преграды не фиксируется. Набегающий на преграду поток считается состоящим из отдельных частиц, каждая из которых достигает преграды и вносит свой вклад в создаваемую потоком взрывную нагрузку. Взаимодействие частиц с преградой считается неидеальным, коэффициент восстановления при ударе $0 < K < 1$ необходимо найти.

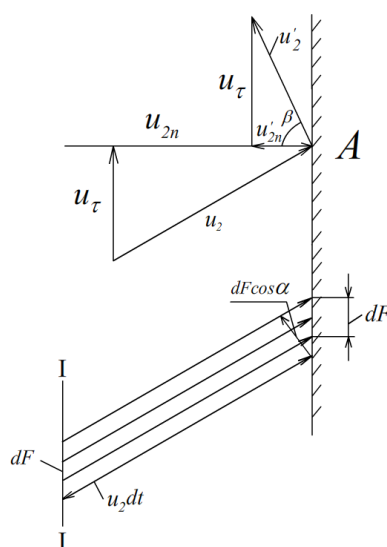


Рис. 1. Расчётная схема к определению давления на преграду

Чтобы найти давление, которое создаёт в этой точке возмущенный поток при его торможении, вырежем мысленно в окрестности точки A бесконечно малую площадку dF и рассмотрим действие на неё частиц потока.

На площадку падает бесконечно малая струйка возмущенной воды, площадь поперечного сечения которой $dF \cdot \cos \alpha$ (Рис. 1). За бесконечно малый промежуток времени dt к площадке dF подойдет масса воды, заключенная в элементарной струйке между преградой и сечением $I-I$, удаленным от преграды на расстояние $u_2 dt \cdot \cos \alpha$. Эта масса определяется в виде

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

где ρ_2 , u_2 – соответственно плотность и скорость частиц среды на фронте падающей водной ударной волны.

При ударе элементарной струйки о преграду, частицы возмущенного потока этой струйки, теряя часть нормальной составляющей скорости, отражаются от преграды

под некоторым углом $\beta \neq \alpha$. Обозначим нормальную составляющую скорости падающего к преграде потока через u_{2n} , а нормальную составляющую скорости отраженного потока через u'_{2n} . Применим к элементарной струйке закон сохранения импульса. Согласно этому закону импульс силы, действующей на преграду dF , равен изменению количества движения струйки

$$PdF \cdot dt = dm \cdot (u_{2n} - u'_{2n}). \quad (2)$$

Заменив элементарную массу dm её значением по формуле (1), получим

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

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

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

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

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

Учитывая соотношение

$$u_{2n} = u_2 \cos \alpha \quad (6)$$

формулу (3) запишем в виде

$$P = (1 + K) \rho_2 u_2^2 \cos^2 \alpha. \quad (7)$$

Для нахождения коэффициента восстановления K воспользуемся его свойствами. Величина K должна принадлежать интервалу ($0 < K < 1$); эта величина является функцией угла падения: $K = f(\alpha)$, при этом с увеличением α коэффициент K уменьшается, в пределе при $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$ величина $K \rightarrow 0$, то есть должно выполняться требование

$$\lim_{\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}} f(\alpha) = 0. \quad (8)$$

Указанным условиям удовлетворяет функция $\cos^2 \alpha$. Положим

$$K = \cos^2 \alpha. \quad (9)$$

С учётом (9) формула (7) примет вид

$$P = (1 + \cos^2 \alpha) \rho_2 u_2^2 \cos^2 \alpha. \quad (10)$$

Рассмотрим теперь влияние расположения заряда над преградой на величину давления P в формуле (10).

Пусть заряд радиуса r_0 расположен над преградой (балкой) в воде на расстоянии a от оси балки, точка x_* - эпицентр взрыва (Рис.2).

Тогда

$$\cos \alpha = \frac{a}{\sqrt{a^2 + (x - x_*)^2}}. \quad (11)$$

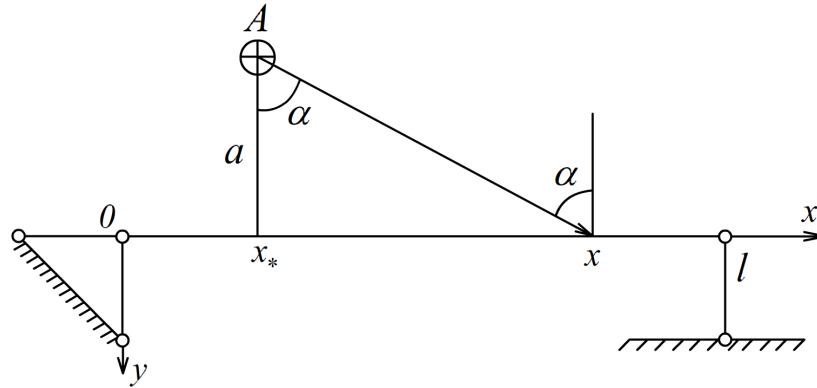


Рис. 2. Схема расположения заряда над преградой

С учётом соотношения (11) формулу (10) можно записать в виде

$$P_m = \frac{a^2 [2a^2 + (x - x_*)^2] \rho_2 u_2^2}{[a^2 + (x - x_*)^2]^2}. \quad (12)$$

Формула (12) определяет максимальное значение давления торможения возмущенного потока воды в момент его отражения от преграды. В большинстве исследований по взрыву в воде, следуя работе [3], принято определять изменение давления со временем в фиксированной точке пространства по формуле

$$\frac{P - P_{01}}{P_{01}} = \frac{P_m - P_{01}}{P_{01}} e^{-\frac{t}{\vartheta}}, \quad (13)$$

в которой время t отсчитывается от момента прихода фронта ударной волны в данную точку, а величина ϑ , называемая постоянной времени, определяется для сферического заряда радиуса r_0 соотношением [1]:

$$\frac{a_{01} \vartheta}{r_0} = 1,4 \left(\frac{a}{r_0} \right)^{0,24}, \quad (14)$$

где r – расстояние от центра взрыва до точки наблюдения, a_{01} – скорость звука в воде.

В соответствии с (13) удельный импульс фазы сжатия

$$i = \int_0^{\tau_+} (P - P_{01}) dt = (P_m - P_{01}) \int_0^{\tau_+} e^{-\frac{t}{\vartheta}} = (P_m - P_{01}) \vartheta (1 - e^{-\frac{\tau_+}{\vartheta}}), \quad (15)$$

где τ_+ – время действия фазы сжатия [1].

В неограниченной среде $\frac{\tau_+}{\vartheta} > 5$ [1], [3], поэтому

$$i = (P_m - P_{01}) \vartheta. \quad (16)$$

Запишем, согласно соотношению для ϑ (14) выражение для удельного импульса (16) в виде

$$i = 1,4 \frac{r_0}{a_{01}} \left(\frac{a}{r_0} \right)^{0,24} \cdot (\eta \rho_2 u_2^2 - P_{01}), \quad (17)$$

где

$$\eta = \frac{a^2 [2a^2 + (x - x_*)^2]}{[a^2 + (x - x_*)^2]^2}. \quad (18)$$

Второй этап. Воздействие импульсной нагрузки взрыва на балку. Постановка задачи.

Физическая модель явления (основные допущения).

Будем считать, что балка по всей длине имеет постоянное сечение, поперечные размеры балки невелики по сравнению с её длиной. Нагрузка прикладывается к балке мгновенно и действует, монотонно убывая, в течение времени τ_+ , которое в пределе можно считать стремящимся к нулю [4].

Пренебрегаем по малости усилиями, возникающими в балке длиной l от её собственного веса, следовательно, можно считать, что до действия нагрузки ось балки прямолинейна, а сама балка находится в покое – начальные смещения всех её точек $y=0$ и начальная скорость всех частиц $y'_x = 0$. Под действием внешней нагрузки частицы балки получают смещения и скорости, которые распределены по длине балки, то есть являются функциями положения сечения x и времени t [1], [2], [4].

Математическая модель и решение задачи.

Поместим начало координат на левом конце балки (Рис. 2), ось x направим вдоль неё, а ось y вниз по направлению действия нагрузки. В этих обозначениях ордината будет выражать собой прогиб балки в сечении, находящемся на расстоянии x от её левого конца в момент времени t , то есть $y=y(x,t)$.

В работе [5] получено уравнение движения балки под действием внешней динамической нагрузки

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \beta^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{K_1 b}{m_* + m_1} P_2(x) \cdot f(t), \quad (19)$$

где P_2 – давление на балку в момент приложения к ней нагрузки, b – ширина балки, K_1 – коэффициент формы, учитывающий расположение балки по отношению к действующей на неё нагрузке [4], $f(t)$ – функция, учитывающая спад давления со временем; эта функция на основе обработки данных многочисленных экспериментов может быть задана в виде

$$f(t) = \left(1 - \frac{t}{\tau_+}\right)^n, \quad (20)$$

где n – параметр, значения которого расположены в интервале $n \in (1; 3)$ в зависимости от величины и вида взрывной нагрузки [4], m_* – погонная масса балки, m_1 – погонная присоединенная масса воды (её введение учитывает сопротивление воды движению балки),

$$\beta = \sqrt{\frac{EJ}{m_* + m_1}}; \quad (21)$$

Так как импульс действует кратковременно, то за время его действия частицы балки не успевают получить заметных смещений, а получают только начальные скорости [1], [2], [4], [5]. Деформирование балки происходит после окончания действия нагрузки, во время ее свободных колебаний, уравнение которых имеет вид

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \beta^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^2} = 0. \quad (22)$$

В случае свободного опирания балки на идеальные (не разрушаемые взрывом) опоры граничными условиями для уравнения (22) будут условия отсутствия перемещений и изгибающих моментов на концах балки; эти условия соответственно примут вид

$$y(0, t) = y(l, t) = 0 \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=l} = 0. \quad (24)$$

Начальные условия в соответствии с характером действующей нагрузки имеют вид

$$y(x, 0) = 0, \quad \left. \frac{\partial y}{\partial t} \right|_{t=0} = \frac{i_*(x)}{m_* + m_1}, \quad (25)$$

где $i_*(x)$ – погонный импульс взрывной нагрузки.

Начально-краевая задача (22)-(25) решена в работе [5] и в размерных переменных x, y может быть записана в виде

$$y(x, t) = \frac{2l}{\pi^2 \beta \mu} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} \cdot \sin j \frac{\pi x}{l} \sin \frac{j^2 \pi^2}{l^2} \beta t \int_0^l i_*(x) \sin \frac{j \pi x}{l} dx. \quad (26)$$

Обозначим

$$S_j = \int_0^l i_*(x) \sin \frac{j \pi x}{l} dx. \quad (27)$$

В момент времени t_* для которого $\sin \frac{j^2 \pi^2}{l^2} \beta t_* = 1$, то есть для

$$t_* = \frac{l^2}{2j^2 \pi \beta}, \quad (28)$$

смещения $y(x, t_*)$ будут максимальны

$$y(x, t_*) = \frac{2l}{\pi^2 \mu \beta} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2} \cdot \sin j \frac{\pi x}{l} S_j. \quad (29)$$

Из формулы (29), определяющей распределение по пролёту балки максимальных смещений в момент времени $t = t_*$ следует, что максимальное из этих смещений будет в середине пролёта балки – при $x = \frac{l}{2}$. Покажем, что в этом сечении будет наблюдаться максимальный изгибающий момент.

Как известно [6], изгибающий момент в любом сечении балки определяется соотношением

$$M = - \frac{EJ \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)}{\left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (30)$$

Следовательно, для M_{\max} в критической точке (при $x = \frac{l}{2}$) должно выполняться условие

$$\left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=\frac{l}{2}} = 0. \quad (31)$$

Для функции $y(x, t_*)$, определенной формулой (29), при подстановке ее в соотношение (31), после преобразований получим

$$\frac{\partial M}{\partial x} = EJ \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right]^{-\frac{5}{2}} \left\{ \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right] - 3 \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right)^2 \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right\}. \quad (32)$$

Из (32) с учётом формулы для $\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$

$$\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}(x, t_*) = -\frac{2\pi}{l^2 \beta \mu} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot S_j \cdot \cos \frac{j\pi x}{l}, \quad (33)$$

следует, что в точке $x = \frac{l}{2}$ (там, где смещения максимальные) $\frac{\partial M}{\partial x} \Big|_{x=\frac{l}{2}} = 0$, поскольку в этой точке $\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=\frac{l}{2}} = \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \Big|_{x=\frac{l}{2}} = 0$.

Итак, получено, что в точке максимального прогиба балки имеет место максимальный изгибающий момент.

Используя один из известных критериев разрушения (по достижению в критическом сечении максимальных нормальных напряжений, из которого следует достижение в этом сечении максимального изгибающего момента [6]), запишем условие гарантированного разрушения в виде

$$\frac{M_{\max}}{W \cdot \delta_{*n}} - K_{0*} \cdot \mu_3 \geq 0, \quad (34)$$

где W – осевой момент инерции сечения балки, δ_{*n} – нормированный браковочный минимум материала балки, K_{0*} – коэффициент однородности на гарантированное разрушение, μ_3 – коэффициент динамичности [2], [4].

Неравенство (34) является трансцендентным относительно радиуса r_0 заряда ВВ при фиксированном значении его расстояния до оси балки и фиксированных геометрических и физических характеристиках заряда и балки. Решение неравенства (34) определяет минимальное значение радиуса заряда r_0 , взрыв которого на фиксированном расстоянии от балки и фиксированном его расположении по пролёту, приводит к гарантированному разрушению балки.

Примеры численных расчётов.

В расчетах по нахождению радиуса r_0 и массы заряда тротила приняты следующие входные данные: длина балки может быть равной $l=1$ [м]; $l=2$ [м]; $l=3$ [м], параметры поперечного сечения для всех длин одинаковы: $b=0.15$ [м]; $h=0.20$ [м], расстояние заряда от оси балки a [м] варьируется; глубина погружения $H = 100$ [м], модуль упругости материала балки $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ [Па], коэффициент динамичности $\mu_3 = 1.8$, коэффициент однородности на гарантированное разрушение $K_{0*} = 1.644$, плотность материала балки (Ст.3) $\rho_0 = 7800$ [кг/м³], нормированный браковочный минимум $\delta_{*n} = 2.4 \cdot 10^8$ [Па], плотность воды $\rho_1 = 1000$ [кг/м³], скорость звука в воде $a_{01} = 1460$ [м/с], давление на поверхности $P_{01} = 101325$ [Па].

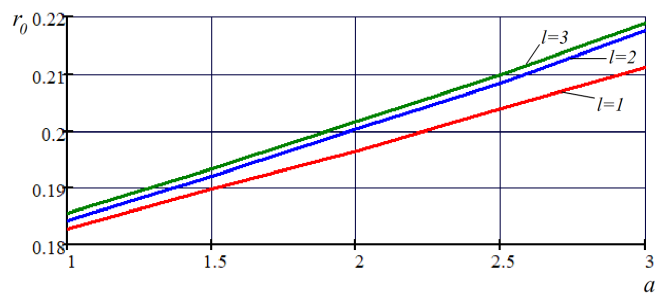


Рис. 3. Зависимость радиуса r_0 заряда ВВ от расстояния a до балки для длин балки $l = 1, 2, 3$ [м], $x_* = \frac{l}{2}$ [м]

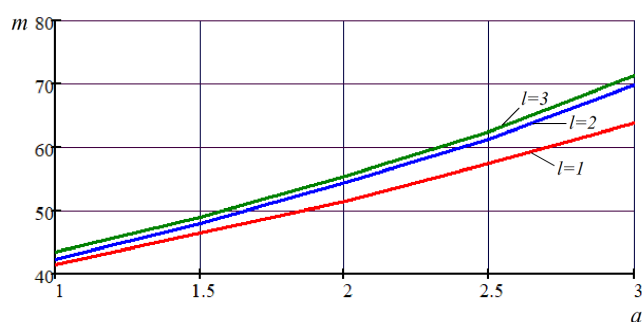


Рис. 4. Зависимость массы m заряда ВВ от расстояния a до балки для длин балки $l = 1, 2, 3$ [м], $x_* = \frac{l}{2}$ [м]

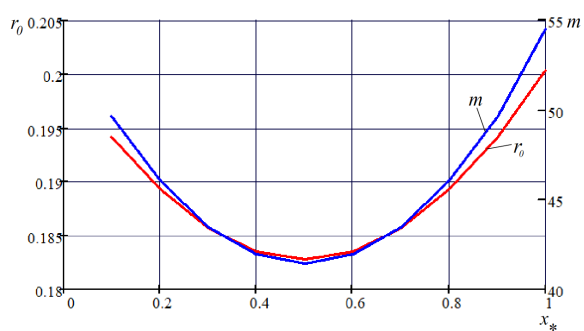


Рис. 5. Зависимость массы m и радиуса r_0 заряда ВВ от смещения x_* при $l = 1$ [м], $a = 1$ [м]

На рисунках 3-6 представлены графики соответствующих зависимостей, полученные по данным расчётов. Из графиков видно существенное влияние на величину радиуса и массы заряда ВВ (тротил) длины балки, расположения заряда по отношению к ней. Следует заметить, что аналогичные графики можно построить по результатам

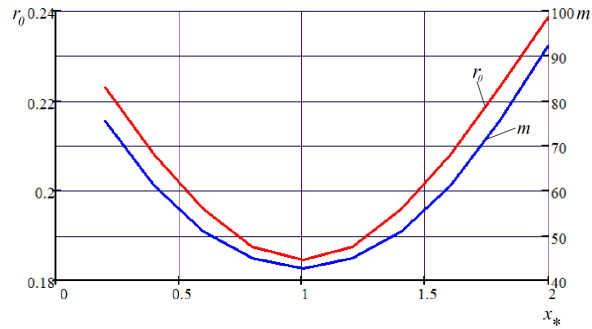


Рис. 6. Зависимость массы m и радиуса r_0 заряда ВВ от смещения x_* при $l = 2$ [м], $a = 1$ [м]

проведенных расчётов для выявления влияния других характеристик (физических и геометрических) заряда и рассматриваемой балочной конструкции на величину заряда, взрыв которого приводит к гарантированному разрушению балки в воде.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Т.М Саламахин. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок. Москва: ВИА, 1974. 255 с.
- [2] Г.Т Володин. Действие взрыва зарядов конденсированных ВВ в газовой и жидких средах. Часть 2. Взрывостойкость и гарантированное разрушение элементов конструкций. Тула: Левша, 2005. 160 с.
- [3] Р.Г Коул. Подводные взрывы. Москва: ИЛ, 1950. 495 с.
- [4] Т.М Саламахин. Разрушение взрывом элементов конструкций. Москва: ВИА, 1961. 275 с.
- [5] Г.Т Володин, Д.С Кочергин. Колебания элементов конструкций под действием взрыва в воде. Чебоксары: Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. № 1(51), 2022. 28-35 с.
- [6] Н.М Беляев. Сопротивление материалов. Москва: Наука, 1976. 607 с.

G. T. Volodin, D. S. Kochergin

GENERALIZED ANALYSIS OF GUARANTEED EXPLOSION DESTRUCTION OF BEAM STRUCTURAL ELEMENTS IN WATER

Tula State University, Tula, Russia.

Abstract. The solution of the problems determining the process of the impact of an explosion of a charge of a condensed explosive substance (BB) on a beam in water is presented. It is noted that this process can be divided into two stages. At the first stage, a pulse load is formed an explosion in water; at the second stage, the impact of this load on the structural element (or the structure as a whole for the corresponding task). For the first stage, for the first time using experimental data, an analytical dependence for the specific impulse from an explosion in water of a spherical charge with specified physical and geometric characteristics was obtained. At the second stage, as a result of solving the corresponding initial boundary value problem, the dependence of the displacement of the beam sections for any moment of time is obtained, which allows us to find the conditions for guaranteed destruction of the beam in accordance with the selected destruction criterion. The statements and solutions of the corresponding tasks take into account: the effects of reflection of the disturbed incident water flow from the barrier (beam), the depth of immersion of the structure and the charge into the water, the physical and geometric characteristics of the charge and the beam, as well as their mutual location in the water, the type of fastening of the beam on supports. A significant influence of these factors on the magnitude of the charge, the explosion of which leads the beam in question to its guaranteed destruction, is noted.

Keywords: explosion in water, guaranteed destruction, pulse load, destruction criterion.

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] 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).
- [3] Salamakhin T. M. Explosion destruction of structural elements. Moscow: VIA, 1961. 275 p. (in Russian).
- [4] Cole R. G. Underwater explosions. Moscow: IL, 1950. 495 p. (in Russian).
- [5] Volodin G. T., Kochergin D. S. Vibrations of elements of beam structures under the action of an explosion in water. Cheboksary: Bulletin of the I. Ya. Yakovlev ChSPU. Series: Mechanics of the limit state. No. 1(51), 2022. 28-35 p. (in Russian).
- [6] Belyaev N. M. Resistance of materials. Moscow: Science, 1976. 607 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.