

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА ПРИБРЕЖНЫЕ ЗДАНИЯ ОТ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

**Котляревский Владимир Абрамович**

*Главный научный сотрудник Научно-образовательного центра исследования экстремальных ситуаций Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФСР*

В статьях [1, 2] рассмотрены методы математического моделирования поражающих эффектов воздушных и наземных взрывов космических тел. При подводных взрывах в жидкости возникают ударные волны, рассмотренные в [3, 4]. На поверхности жидкости появление гравитационных волн связано с тем, что жидкость находится в поле силы тяжести. Ветровые волны в условиях шторма являются частным случаем гравитационных волн. В сейсмически активных районах нагрузки на подводные конструкции возникают от движений морского дна и связанных с ним опор конструкций.

Ниже представлен алгоритм моделирования поражающих эффектов волнообразования при подводных взрывах космических тел, позволяющий устанавливать нагрузки гравитационных волн как на прибрежные сооружения, так и на суда на море, подвижные и стационарные морские платформы для разведки и добычи нефти на континентальном шельфе [5].

Подводный энергетический источник соответствует взрыву космического тела на определенной глубине. Масса космического тела определяется по его плотности и линейному размеру как диаметру сферы. Механический эквивалент энергии взрыва принимается с коэффициентом  $\beta < 1$  его кинетической энергии – с учетом потерь на трение в процессе проникания в воду на глубину взрыва, на пульсации газового пузыря, образование «султана», базисной волны и сопутствующие эффекты.

Расчет основан на данных, полученных экспериментально при подводных ядерных взрывах [6]. Основными параметрами поражающего действия водяных гравитационных волн являются высота волны и скоростной напор, изменяющиеся со временем при распространении на континентальном шельфе и далее на прибрежной территории.

Экспериментальная информация представлена в функции параметров подводного взрыва от глубины  $Z_1$  и эпицентрального расстояния  $R$  энергетического источника с тротиловым эквивалентом  $W_1 = 1$  кт. Пе-

решет на иную мощность  $W$  взрыва на глубине  $Z$  осуществляется с использованием закона подобия

$$\frac{Z}{Z_1} = \left( \frac{W}{W_1} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Подставив  $W_1 = 1$ , запишем формулу для параметров  $S$  подводного взрыва

$$S = S_1 W^{\frac{1}{3}} \text{ и } Z = Z_1 W^{\frac{1}{3}}.$$

### Высота волны

Для определения высоты волны  $H$  использована табуляция (табл.1) графической зависимости (рис. 1) [6] высоты волны  $H_1$  взрыва  $W_1 = 1$  кт от расстояния  $R$  на двух глубинах  $Z_1$ :

Таблица 1

Данные по высоте волны  $H$  подводного взрыва 1 кт на двух глубинах

R, км	0	1,6	3,2	4,5	6,4	11,2	16,0	32,0	64,0	100	112	160	300
Глубина взрыва $Z_{1,25} = 25$ м													
$H_{1,25}$ , м	~7	3,5	1,9	1,5	1,0	0,6	0,46	0,25	0,14	0,10	0,05	0	0
Глубина взрыва $Z_{1,120} = 120$ м													
$H_{1,120}$ , м	~20	10,0	5,0	3,5	2,3	1,45	1,0	0,5	0,27	0,15	0,15	0,10	0

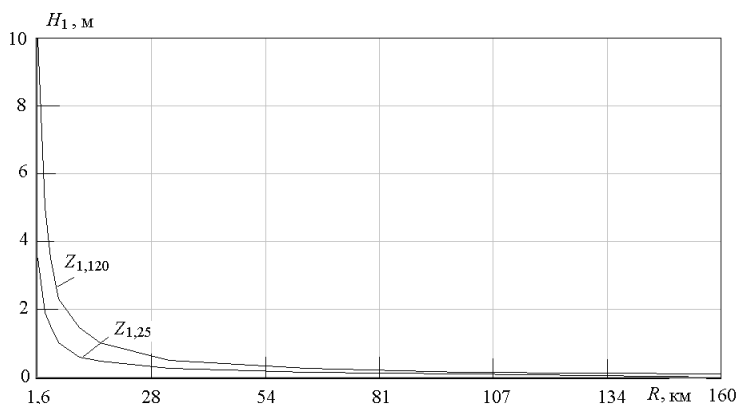


Рис. 1. Зависимость высоты  $H_1$  гравитационной волны подводного взрыва 1 кт от дистанции  $R$  на глубинах  $Z_{1,25} = 25$  м и  $Z_{1,120} = 120$  м

По задаваемому значению  $R$  интерполяцией табл. 1 находим значения высоты волн  $H_{1,25}$  и  $H_{1,120}$  для двух глубин  $Z_{1,25} = 25$  м и  $Z_{1,120} = 120$  м. Для взрыва  $W$  на глубине  $Z$  определяется приведенная к 1 кг глубина  $Z_1$

$$Z_1 = Z / \sqrt[3]{W}.$$

Если  $Z_{1,25} < Z_1 < Z_{1,120}$ , то приведенную высоту волны  $H_1$  определим по формуле

$$H_1 = H_{1,25} + Z_1 \cdot (H_{1,120} - H_{1,25}) / (Z_{1,120} - Z_{1,25}).$$

Высота волны  $H$  на эпицентральной дистанции  $R$  подводного взрыва на глубине  $Z$  равна

$$H = H_1 \sqrt[3]{W}.$$

Для приведенной глубины взрыва менее  $Z_{1,25}$  высота волны определяется интерполяцией верхней строки табл. 1. Для приведенной глубины взрыва более  $Z_{1,120}$  высота волны определяется интерполяцией нижней строки табл. 1.

На прибрежной дистанции до величины  $R_0 = 0,65$  км высота волны корректируется (по опытным данным взрыва Бэйкер) умножением на коэффициент  $\alpha$  при  $\alpha_m = 4,403$  и  $R_* = 0,841$  км:

$$\alpha = \alpha_m (1 - R / R_*) \quad 0 < R < R_0.$$

Данный алгоритм апробирован сравнением расчета высоты гравитационной волны с экспериментальными данными. Анализ опытных данных подводных взрывов показал, что на образование гравитационной волны расходуется примерно треть полного тротилового эквивалента энергоносителя, и в программе учтен данный коэффициент  $\beta = 1/3$ . Данными табл. 2 и рис 2 проиллюстрировано согласие расчета высоты гравитационной волны на различных дистанциях от эпицентра с экспериментом подводного взрыва «Бэйкер» [6] мощностью 20 кт на глубине 26 м.

Таблица 2

Сравнение расчета на дистанциях  $R$  высоты  $H$  гравитационной волны с экспериментом подводного взрыва «Бэйкер» мощностью 20 кт

<b>R, м</b>	300	600	1200	1825	2450	3000	3650
<b>H - Расчет, м</b>	33,8	13,5	8,23	6,16	4,99	3,95	3,38
<b>H - Опыт, м</b>	28,6	14,3	7,3	4,8 5	3,94	3,34	2,7 4

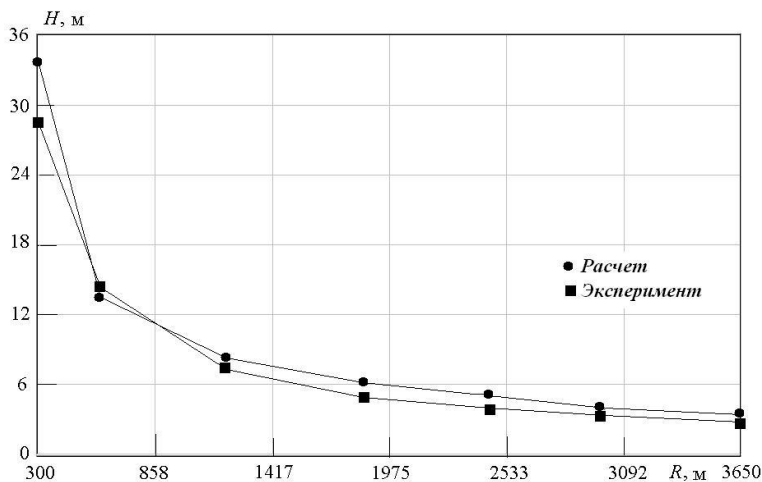


Рис. 2. Сравнение расчета изменения на дистанциях  $R$  высоты  $H$  гравитационной волны с экспериментом подводного взрыва «Бэйкер» с тротильным эквивалентом 20 кт

### Волновые нагрузки

Лобовая погонная нагрузка  $N$  на прибрежные объекты от действия набегающей гравитационной волны равна сумме нагрузок от скоростного напора  $q$  и среднего гидростатического давления  $p$  с учетом соотношения высот объекта  $h$  и волны  $H$ , а также коэффициента обтекания объекта  $C_w$

$$N = H (C_w q + p) \quad (h \geq H), \quad N = h (C_w q + p) \quad (h < H) .$$

Скоростной напор в волне определяется по плотности  $\rho$  морской воды и массовой скорости волны  $V$

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 .$$

Скорость принимается зависящей от высоты волны обработкой известных опытных данных взрывов 20 кт на глубине 27 м и 100 кт на глубине 100 м. Скорость определялась дифференцированием табличных зависимостей дистанции волны от времени. Обработкой данных установлено, что скорость гравитационной волны слабо зависит от мощности взрыва и при высотах волн до 60 м меняется в пределах 35-20 м (табл. 3). В расчете скорость вычисляется линейной интерполяцией данной таблицы.

Таблица 3  
Зависимость скорости  $V$  гравитационной волны от высоты  $H$

$H, \text{ м}$	54	32	29	14	7,3	4,85	3,94	3,34	2,74	0,1
$V, \text{ м/с}$	35	28	26	24,3	23,8	23,6	22,2	22,1	22,0	20,0

Давление  $p$  в формулах для погонной нагрузки равно

$$p = \frac{1}{2} \rho g H \quad (h \geq H), \quad p = \frac{1}{2} \rho g H (2 - h/H) \quad (h < H),$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

### Программа «ШЕЛЬФ». Нагрузки на прибрежные здания

Алгоритм расчета реализован в программе «ШЕЛЬФ». Для примера представлены результаты расчета параметров гравитационных волн на береговой линии при различных эпицентральных дистанциях подводного взрыва на глубине 50 м космического тела диаметром 17 м плотностью  $3000 \text{ кг/м}^3$  при скорости удара 18 км/с. Глубина моря 200 м, плотность воды  $1200 \text{ кг/м}^3$ . Расчет полной лобовой силы проведен для зданий высотой 18 м с коэффициентом  $C_w = 1$ . Тротилловый эквивалент взрыва 295 кгт.

В табл. 4 на дистанциях  $R$  взрыва от берега приведены значения параметров гравитационной волны на береговой линии: высоты волны  $H$ , отношения высот здания и волны  $h/H$ , скорости волны  $V$ , скоростного напора  $q$ , погонных нагрузок на здание – гидростатической  $N_S$ , гидродинамической  $N_D$  и суммарной  $N_{sum}$ .

Таблица 4  
Нагрузки на здания гравитационных волн подводного взрыва космического тела с тротилловым эквивалентом 295 кгт на глубине 50 м

$R, \text{ км}$	$H, \text{ м}$	$h/H$	$V, \text{ м/с}$	$q, \text{ МПа}$	Погонные нагрузки на здания, МН/м		
					$N_S$	$N_D$	$N_{sum}$
0,5	48,7	0,37	33,3	0,665	8,41	12,0	20,4
2	14,3	1,26	24,3	0,355	1,21	5,08	6,29
5	6,43	2,80	23,7	0,338	0,24	2,17	2,42
10	3,23	5,57	22,1	0,293	0,06	0,95	1,01
50	0,87	20,7	20,6	0,254	0,01	0,22	0,23

## Выводы

Приведенный алгоритм определения параметров гравитационных волн подводных взрывов опасных космических тел может быть применен для прогнозирования поражающих нагрузок на прибрежные строения.

## Библиографический список

1. Котляревский В.А., Ларионов В.И. Сейсмическая опасность падения астероидов на земную поверхность. // Электронный ресурс: Наука и безопасность, №3(3), март 2012, с.159-176. URL:<http://www.art-atis.com>.
2. Александров А.А., Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Астероидная уязвимость Земли. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия «Машиностроение», 2013, №2(91). С. 56-83.
3. Cole R.H. Underwater explosions. Princeton, – New Jersey, 1948. Пер. с англ. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: ИЛ. 1950.
4. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. – Л.: Судостроение, 1969.
5. Котляревский В.А. Морские волны и нагрузки на подводные конструкции // Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. Том 1. Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия – М.: НАУКА, 2005. С. 643–668.
6. Действие ядерного оружия. – М.: Воениздат, 1963.