

А.И. Дульнев¹, В.В. Чижевский²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ОАО «ЦКБ «Лазурит», Санкт-Петербург, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОПРЕГРАДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНТАКТНОГО ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

Объект и цель научной работы. Исследование физической картины разрушения многопреградных конструкций при контактном подводном взрыве и получение оценок влияния их основных конструктивных параметров (толщина преград, расстояние между ними и т.п.), а также влияния различных типов заполнителя, расположенного между преградами, на предельную взрывосопrotивляемость конструкции в целом и объем разрушений отдельных преград.

Материалы и методы. Проведенные исследования базируются на результатах испытаний масштабных макетов многопреградных конструкций, изготовленных из стали. В качестве заполнителя использовалась вода или двухфазная газожидкостная среда пузырьковой структуры.

Основные результаты. Предложены и обоснованы эмпирические зависимости, определяющие параметры деформирования главной преграды и размеры разрушения наружной обшивки и разделительной преграды. Показано, что применение в составе многопреградных конструкций двухфазной газожидкостной среды позволяет в условиях контактного подводного взрыва существенно уменьшить размеры разрушений отдельных преград, а также повысить взрывосопrotивляемость конструкции в целом.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании многопреградных систем, эффективно сопротивляющихся подводному взрыву, а также для верификации расчетных моделей воздействия контактного подводного взрыва на корпусные конструкции.

Ключевые слова: контактный подводный взрыв, преграда, заполнитель.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Дульнев А.И., Чижевский В.В. Экспериментальные исследования многопреградных конструкций при воздействии контактного подводного взрыва. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 61–76.

УДК 624.046.5:623.566.5

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-61-76

A.I. Dulnev¹, V.V. Chizhevsky²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Lazurit Central Design Bureau, St. Petersburg, Russia

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MULTIPLE BARRIER STRUCTURES SUBJECT TO CONTACT UNDERWATER EXPLOSION

Object and purpose of research. The paper investigates the physical failure patterns in multiple barrier structures caused by a contact underwater explosion and looks at how the ultimate explosion resistance of the total structure and damage of individual barriers depend on the main structural parameters (thickness of barriers, spacing of barriers, etc.) as well as various types of filler materials between barriers.

Materials and methods. The studies are based on the model test data obtained for steel multiple-barrier structures. Water or two-phase gas/liquid medium of bubble structure are used as fillers.

Main results. Empirical relations are suggested and justified for estimation of deformation parameters for the main barrier as well as the extent of damage to outer plating and dividing barrier. It is shown that by using a two-phase gas/liquid filler in multiple-barrier structures it is possible to significantly reduce damage inflicted on individual barriers as well as to raise the overall level of structure resistance to contact underwater blasts.



Conclusion. The results of this study can be useful in design of multiple barrier systems for efficient resistance to underwater explosions, as well as in verification of computational models of contact underwater explosions on hull structures.

Key words: contact underwater explosion, barrier, filler.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Dulnev A.I., Chizhevsky V.V. Experimental investigation of multiple barrier structures subject to contact underwater explosion. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 61–76 (in Russian).

UDC 624.046.5:623.566.5

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-61-76

Введение

Introduction

Конструкции морских объектов (суда, подводные аппараты, морские трубопроводы, платформы и др.) в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию подводного взрыва. К настоящему времени достаточно хорошо изучены процессы формирования и параметры поражающих факторов (ударная волна, вторичные пульсации газового пузыря) при взрыве в свободной воде [1–5]. Воздействие взрыва с качественной точки зрения обычно принято характеризовать как контактное, близкое неконтактное и неконтактное (удаленное неконтактное). В условиях воздействия удаленного неконтактного взрыва, как правило, основное внимание уделяется анализу параметров движения (сотрясений) конструкций [6–12], что связано с необходимостью определения нагрузок, действующих на оборудование. С точки зрения обеспечения прочности конструкций, а также предотвращения или ограничения их разрушений наибольшую опасность представляют контактные или близкие неконтактные подводные взрывы. Исследования последствий воздействия таких взрывов проводятся, как правило, применительно к однопреградным конструкциям в виде пластин или перекрытий, изготовленных из металлических [13–17] либо полимерных композиционных [18–23] материалов. В то же время многие судовые конструкции представляют собой многопреградные системы, например, дно – второе дно, борт (двойной борт) – продольная переборка и т.п. Кроме того, многопреградные системы могут применяться как специальные конструкции для защиты объектов или отдельных помещений от воздействия контактного подводного взрыва [24, 25]. При этом в составе таких систем между преградами располагается различного типа заполнитель – обычно вода или другая жидкость. Несмотря на достаточно широкое распространение многопреградных конструкций имеется, насколько известно авторам, относительно небольшое количество публикаций, посвященных исследованию различных аспектов их

взрывоспротивляемости [26–28]. Как показывают данные исследования, заметное влияние на взрывоспротивляемость таких конструкций оказывает жидкий заполнитель. В связи с этим представляет интерес исследование эффективности применения в качестве заполнителя специальных сред. В частности, известно, что для ослабления ударных волн могут использоваться двухфазные газожидкостные среды, в которых газ (воздух) формируется в виде пузырьков [4, 29–32]. Однако эффективность применения такой среды в составе многопреградных конструкций для условий контактного взрыва требует экспериментального подтверждения.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование физической картины разрушения многопреградных конструкций при контактном подводном взрыве и получение оценок влияния их основных конструктивных параметров (толщина преград, расстояние между ними и т.п.), а также влияния различных типов заполнителя на предельную взрывоспротивляемость конструкции в целом и объем разрушений отдельных преград.

Испытания конструкций проводились во взрывной камере ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Постановка эксперимента и опытные конструкции

Experimental setup and test structures

Опытные конструкции представляли собой упрощенные масштабные макеты судовой конструкции, включающей наружную обшивку (НО) и продольные переборки. Основными типовыми элементами макетов являлись (рис. 1):

- каркас, состоящий из стальных планок толщиной от 20 до 80 мм;
- стальные безнаборные пластины (преграды) толщиной от 0,35 до 4 мм, имитирующие наружную обшивку борта и переборки;
- фланцы толщиной 10 мм;
- крепежные комплекты, состоящие из шпилек, шайб и гаек.

Каркас и система преград образуют замкнутые объемы (камеры): перед опытом они оставались пустыми (заполненными воздухом) либо в них размещался наполнитель. В качестве наполнителя использовалась вода или двухфазная смесь (смесь воды с воздушно-пузырьковой структурой). Камера между последней (по отношению к расположению заряда ВВ) и предпоследней преградами всегда была пустой. Эта камера имитирует внутреннее (защищаемое) помещение, а предпоследняя преграда является главной преградой (ГП), ограничивающей распространение разрушений. Камера, занятая воздухом, далее называется воздушной камерой (ВК), заполненная водой – балластной камерой (БК), а заполненная двухфазной смесью – воздушно-водяной камерой (ВВК). Преграда, расположенная между наружной и главной, называется разделительной преградой (РП), а последняя в макете преграда – фильтрационной (ФП).

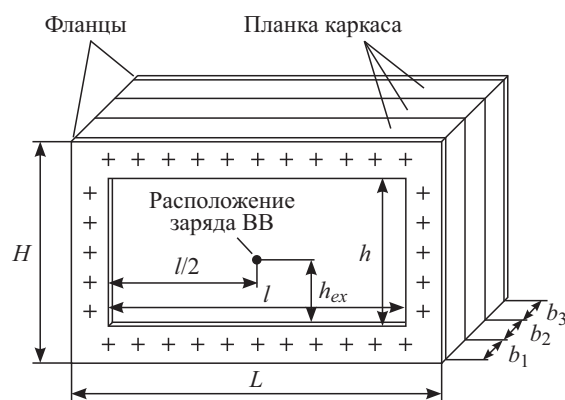


Рис. 1. Типовая схема макета с четырьмя переборками

Fig. 1. Standard model with four bulkheads

Таблица 1. Геометрические характеристики макетов второй группы с балластной камерой, заполненной водой

Table 1. Geometric characteristics of the 2nd batch of test models with ballast chamber

Вариант макета	Схема макета	Примечание
1		Испытано 4 макета зарядами массой 20, 30, 35 и 50 г
2		Испытано 2 макета зарядами массой 30 и 35 г
3		Испытано 2 макета зарядами массой 30 и 40 г
4		Испытан 1 макет зарядом массой 30 г
5		Испытано 2 макета (толщина НО 0,6 и 0,8 мм) зарядом массой 35 г. ГП (4,0 мм) изготовлена из стали Ст3

Взрывосопrotивляемость опытных конструкций оценивалась по характеру и размеру разрушений наружной обшивки и разделительных преград, а также по характеру и величине остаточных прогибов и относительных деформаций главной преграды.

Испытывались две группы макетов. Для испытаний первой группы использовался каркас, имеющий габаритные размеры ($L \times B$) 600×600 мм и рабочее поле ($\ell \times h$) 400×400 мм. Все макеты этой группы имели по четыре преграды (НО, РП, ГП и ФП),

изготовленные из стали Ст3 (предел текучести $\sigma_y = 235$ МПа, предел прочности $\sigma_{us} = 400\text{--}520$ МПа, относительное удлинение при разрыве $\delta = 22\%$). В камере между НО и РП, как правило, находился воздух. Камера между РП и ГП заполнялась водой (на 85 % от объема этой камеры). В макетах данной группы были приняты одинаковыми расстояние от НО до ГП ($b_0 = 160$ мм) и от ГП до ФП ($b_3 = 40$ мм), а также толщина НО ($s_1 = 0,8$ мм) и ГП ($s_3 = 2,5$ мм). Варьировались ширина ВК b_1 и толщина РП s_2 .

Таблица 2. Геометрические характеристики макетов второй группы с воздушно-водяной камерой

Table 2. Geometric characteristics of the 2nd batch of test models with air/water chamber

Вариант макета	Схема макета	Примечание
6		Испытано 2 макета зарядами массой 30 и 40 г
7		Испытано 2 макета зарядами массой 30 и 40 г
8		Испытано 2 макета зарядами массой 30 и 35 г
9		Испытано 2 макета зарядами массой 30 и 35 г
10		Испытано 2 макета зарядами массой 40 и 50 г
11		Испытан 1 макет зарядом массой 40 г

При этом в одной из серий макетов принималось $s_2 = 0,35$ мм и $b_1 = 0, 40, 60, 80, 100, 120, 160$ мм, а в другой серии – $s_2 = 0,8$ мм и $b_1 = 40, 60, 80, 100$ мм. С целью оценки влияния на результаты опытов различных случайных факторов в серии с толщиной РП $s_2 = 0,35$ мм были испытаны одинаковые макеты при $b_1 = 60$ мм в количестве 7 шт., при $b_1 = 80$ мм – 14 шт. и при $b_1 = 100$ мм – 8 шт.

Все макеты первой группы испытывались одинаковыми зарядами цилиндрической формы (отношение длины заряда к диаметру ~ 1) из пресованного тротила (ТНТ) массой $Q_{\text{ТНТ}} = 27$ г (плотность $\rho_{\text{ТНТ}} = 1600$ кг/м³; удельная энергия взрыва $q_{\text{ТНТ}} = 4,23$ МДж/кг; скорость детонации $D_{\text{ТНТ}} = 6900$ м/с).

Для испытаний макетов второй группы использовался каркас, имеющий габаритные размеры ($L \times B$) 1000×600 мм и рабочее поле ($\ell \times h$) 800×400 мм. Макеты этой группы имели балластную с водой и/или воздушно-водяную камеру. В ходе испытаний варьировались размеры этих камер, количество РП, толщины НО, РП и ГП, масса заряда и некоторые другие параметры макетов. Основные геометрические характеристики макетов второй группы приведены в табл. 1 и 2 (все размеры в таблицах указаны в мм).

Все преграды второй группы макетов, кроме ГП, были изготовлены из стали Ст3, ГП – из стали 10ХСНД ($\sigma_y = 390$ МПа, $\sigma_{us} = 510\text{--}660$ МПа, $\delta = 20\%$). В варианте 5 (табл. 1) ГП была изготовлена из стали Ст3. Как и для макетов первой группы, балластная камера (табл. 1) заполнялась водой на 85 % от объема камеры. Воздушно-водяная камера формировалась с использованием полиэтиленовой воздушно-пузырьковой пленки (ТУ 2255-001-89122026-2009, производитель – ООО «Невские стройматериалы»). Для этого при сборке макета внутрь камеры укладывалась указанная пленка, предварительно нарезанная листами необходимого размера. Количество листов пленки выбиралось таким, чтобы при полном заполнении камеры водой содержание пузырьков воздуха составляло 30 % от объема камеры.

Макеты второй группы испытывались зарядами цилиндрической формы (отношение длины заряда к диаметру ~ 1) из пластического ВВ ($\rho_{\text{ВВ}} = 1350$ кг/м³; $q_{\text{ВВ}} = 4,1$ МДж/кг; $D_{\text{ВВ}} = 7200$ м/с). Состав ВВ: гексоген – 80 %, флегматизатор – 20 %.

Испытания проводились применительно к условиям взрыва у борта. Для каждого опыта собирался макет в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Макет на стальных стропах подвешивался

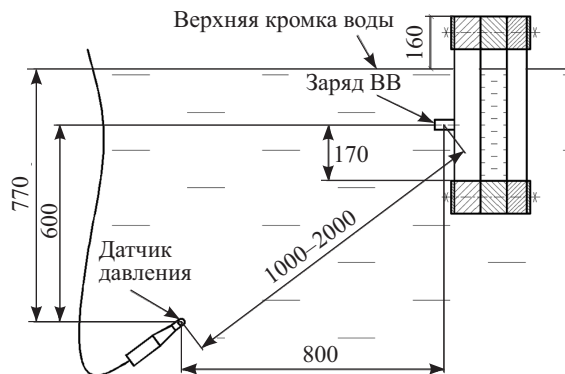


Рис. 2. Схема установки макета и заполнения взрывной камеры водой

Fig. 2. Model mounting details and water fill-up procedure in explosion test chamber

в камере так, чтобы уровень воды в камере находился на 160 мм ниже верхней кромки макета (рис. 2). Это обеспечивало имитацию положения ватерлинии. Заряд располагался в центре НО на уровне середины осадки макета $h_{ex} = 170$ мм. Для оценки полноты детонации заряда в камере в свободной воде устанавливались датчики давления.

После каждого опыта при испытаниях макетов второй группы производились измерения размеров и площади пробоины «в свету» (без учета отдельных разрывов) НО и РП, распределение прогибов ГП в вертикальной и горизонтальной плоскости, проходящей через эпицентр взрыва, а также относительные остаточные деформации ГП на базе 100 мм в районе эпицентра взрыва.

Результаты испытаний и их обсуждение

Test results and discussion

Испытания макетов с балластной камерой, заполненной водой

В общем случае при наличии в составе многопреградной конструкции как ВК, так и БК качественная картина процесса нагружения и разрушения преград состоит в следующем. В результате контактного взрыва в НО образуется пробоина, начальный диаметр которой примерно равен диаметру заряда. Разрушенный участок НО образует осколочный поток, распространяющийся в направлении РП. Практически одновременно в образовавшуюся пробоину, разрывая и отгибая ее края, начинают истекать продукты детонации и вода,

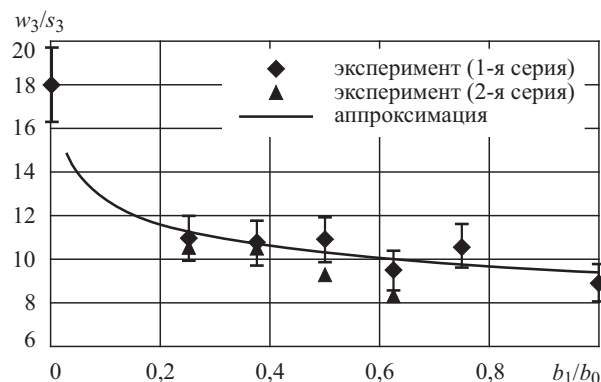


Рис. 3. Влияние ширины воздушной камеры на прогиб главной преграды (испытания первой группы макетов)

Fig. 3. Influence of air chamber width on deflection of main barrier (1st batch tests)

непосредственно примыкающая к заряду. Разделительная преграда от воздействия потока осколков, продуктов детонации и гидродинамической струи разрушается, а в процессе их торможения в жидкости БК формируется ударная волна. Затекающие в БК продукты детонации и гидродинамическая струя вытесняют воду из этой камеры, что, в свою очередь, может приводить (в зависимости от соотношения ширины ВК и БК) к выпучиванию РП и НО наружу. В результате затекания и торможения указанных выше поражающих факторов, а также отраженных от границ БК ударных волн и образующихся в камере высокоскоростных потоков жидкости формируется сложная картина динамического нагружения ГП. Действие данной нагрузки приводит к пластическому деформированию (без разрушения) этой преграды. Нагрузка в ФК формируется в результате адиабатического сжатия воздуха. Уровень этой нагрузки достаточно мал и не приводит к заметному деформированию ФП.

Несколько иная картина нагружения и разрушения преград имеет место при отсутствии воздушной либо балластной камеры. В случае отсутствия заполненной водой БК осколочный поток, образующийся при разрушении НО и РП, продукты детонации и гидродинамическая струя воздействуют непосредственно на ГП. В результате ГП помимо общего пластического прогиба получает ярко выраженную вмятину напротив центра взрыва, а также отдельные выбоины от воздействия осколков. В рассматриваемых опытах пробитие ГП осколками не происходило, однако при определенных условиях взрыва и конструктивных размерах

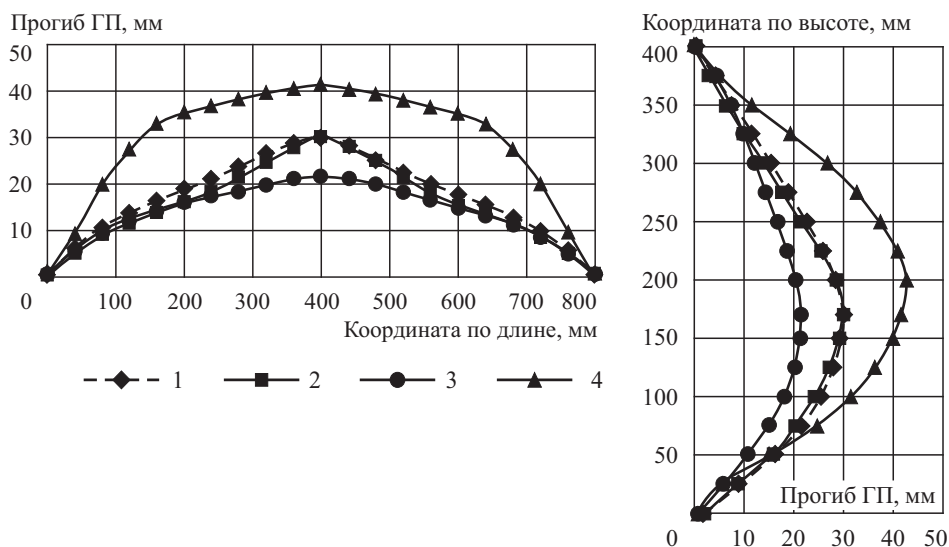
многопреградной конструкции такое разрушение ГП может иметь место. Неразрушенные части НО и РП получают общий прогиб внутрь макета. В случае отсутствия ВК формирование нагрузки на РП и ГП происходит в основном за счет распространения внутрь макета подводной ударной волны и продуктов детонации. Размер пробоины в НО заметно меньше, чем в макетах с ВК. С другой стороны, прогиб ГП значительно возрастает. Это обусловлено тем, что при отсутствии ВК главная преграда находится, по существу, в условиях воздействия высокоинтенсивной подводной ударной волны близкого неконтактного взрыва. Воздействие ударной волны на РП происходит по схеме «вода – вода» (в этом случае нагрузка от ударной волны на преграду относительно невелика) и если отстояние РП от заряда таково, что отсутствует непосредственное воздействие продуктов детонации, то разрушение этой преграды в большинстве случаев не происходит.

Испытания макетов первой группы были направлены на получение количественных оценок (эмпирической зависимости) влияния соотношения ширины ВК и БК на взрывсопротивляемость многопреградных конструкций в целом. Такая оценка выполнялась по величине максимального остаточного прогиба ГП. На рис. 3 приведены экспериментальные данные зависимости максимального относительного остаточного прогиба ГП (w_3/s_3) от относительной ширины ВК (b_1/b_0). Испытания макетов, имевших одинаковые конструктивные размеры, показали, что коэффициент вариации (отношение среднего квадратического отклонения к среднему арифметическому) относительного прогиба не превышает 10 % (при $b_1/b_0 = 0,375 - 6,0$ %; при $b_1/b_0 = 0,5 - 9,4$ % и при $b_1/b_0 = 0,625 - 7,9$ %). Это является достаточно высоким показателем для испытаний, связанных с разрушением при взрывных воздействиях. На рис. 3 показана максимальная планка погрешности 9,4 %.

Из результатов испытаний макетов первой группы видно, что наличие ВК приводит в целом к уменьшению прогиба ГП. Наиболее резко это уменьшение происходит в диапазоне относительной ширины ВК от 0 (отсутствие ВК) до 0,15. При дальнейшем увеличении ширины ВК ее влияние на прогиб проявляется в значительно меньшей степени. Такое влияние ширины ВК объясняется отмеченным выше сложным характером формирования динамической нагрузки, действующей на ГП. Из сравнения результатов испытаний первой и второй серий макетов можно отметить, что при небольшой

Рис. 4. Распределение прогибов главной преграды по длине и высоте при испытаниях макетов второй группы (варианты 1–4, масса заряда ВВ $Q = 30$ г)

Fig. 4. Distribution of main barrier deflections (over length and height) as per the 2nd batch tests (versions 1–4, charge mass $Q = 30$ g)



ширине ВК ($b_1/b_0 = 0,25$ и $0,333$) увеличение толщины РП более чем в два раза (от $s_2 = 0,35$ мм до $s_2 = 0,8$ мм) мало влияет на величину максимального прогиба. Наиболее вероятно это связано с тем, что при небольшой ширине ВК интенсивность воздействия потока осколков, продуктов детонации и гидродинамической струи в рассматриваемых опытах была настолько велика, что указанное изменение толщины РП практически не повлияло на формирование динамической нагрузки на ГП.

В соответствии с обработкой результатов испытаний макетов первой серии (здесь и далее обработка производилась с использованием Excel) получена следующая аппроксимационная зависимость (уравнение регрессии) максимального остаточного прогиба ГП от ширины ВК (рис. 3):

$$\frac{w_3}{s_3} = 9,4 \left(\frac{b_1}{b_0} \right)^{-0,13}.$$

Коэффициент детерминации R^2 [33], характеризующий тесноту связи аппроксимационной зависимости с экспериментальными данными, т.е. качество уравнения регрессии, составил $R^2 = 0,56$. Отметим, что для качественной оценки величины R^2 может быть использована шкала Чеддока [34], в соответствии с которой при $R^2 = 0,3-0,5$ связь умеренная, при $R^2 = 0,5-0,7$ – заметная, при $R^2 = 0,7-0,9$ – высокая и при $R^2 = 0,9-0,99$ – весьма высокая. Принято считать, что уравнение регрессии является приемлемым, если $R^2 \geq 0,5$.

Аналогичные оценки влияния ширины ВК были получены и при испытаниях макетов второй груп-

пы. На рис. 4 приведено распределение прогибов ГП по длине и высоте преграды для вариантов 1, 2 и 4 при $b_0 = 120$ мм, а также для варианта 3 при $b_0 = 160$ мм. Из приведенных результатов видно, что максимальный прогиб ГП, как и для макетов первой группы, при $b_1/b_0 = 0,333$ (вариант 1) и $0,667$ (вариант 2) практически одинаков. При этом полнота формы прогиба при уменьшении ширины ВК и, соответственно, увеличении ширины БК несколько увеличивается. Сравнение результатов испытаний вариантов 1 и 2 с вариантом 3 показывает, что увеличение расстояния b_0 до ГП приводит, с одной стороны, к уменьшению максимального прогиба ГП, а с другой, к более плавному распределению прогиба по высоте и длине преграды и отсутствию выраженной вмятины напротив взрыва, которая связана с локальным воздействием потока осколков и гидродинамической струи. Отсутствие ВК ($b_1/b_0 = 0$) в варианте 4 приводит к заметному увеличению максимального прогиба, а форма прогиба по длине преграды при рассматриваемом соотношении $\ell/h = 2$ приобретает вид, характерный для цилиндрического изгиба пластин при действии равномерно распределенной нагрузки.

Следует отметить, что приведенные экспериментальные данные о влиянии на прогиб ГП соотношения ширины ВК и БК несколько отличаются от выводов, сделанных в работе [26] на основании численных расчетов. В [26] представлены результаты, демонстрирующие практически обратно пропорциональную зависимость прогиба от ширины ВК. Возможно, различие в результатах связано с тем, что в указанной работе пренебрегается дей-

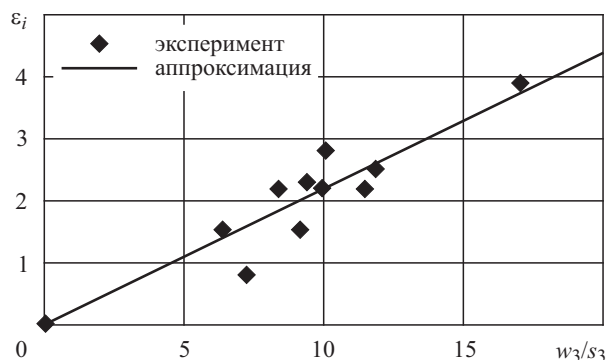


Рис. 5. Зависимость интенсивности пластических деформаций от максимального прогиба главной преграды

Fig. 5. Intensity of plastic strains versus maximum deflection of main barrier

ствием осколочного потока и не учитывается влияние свободной поверхности воды над зарядом ВВ, а также наличие воздушной «подушки» в БК.

Совместный анализ результатов испытаний макетов 1-й и 2-й групп позволяет получить оценку зависимости прогиба ГП и от других параметров многопреградной конструкции, а именно от величины массы заряда Q , толщины ГП s_3 и РП s_2 , отстояния ГП от НО b_0 и от соотношения длины к высоте ГП ℓ/h . Для выполнения совместного анализа необходимо определить коэффициент приведения толщины ГП из стали 10ХСНД к стали Ст3 и тротиловый эквивалент зарядов из пластического ВВ.

Прежде всего, отметим, что в соответствии с экспериментальными данными интенсивность пластических деформаций ГП в районе эпицентра

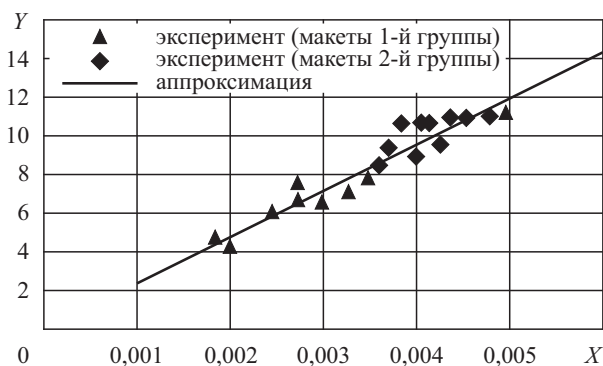


Рис. 6. Влияние параметров многопреградной конструкции на прогиб главной преграды

Fig. 6. Influence of multiple-barrier structure parameters on deflection of main barrier

взрыва практически линейно зависит от максимального прогиба ГП (рис. 5):

$$w_3 / s_3 = 0,22 \varepsilon_i,$$

где ε_i – интенсивность пластических деформаций. Коэффициент детерминации приведенной аппроксимационной зависимости составляет $R^2 = 0,85$. На рис. 5 представлены результаты испытаний макетов второй группы – варианты 1–3, 5. Интенсивность пластических деформаций в рассматриваемых условиях определялась в соответствии с зависимостью

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2},$$

где ε_1 и ε_2 – главные деформации (в районе эпицентра взрыва главные деформации примерно соответствуют вертикальным и горизонтальным деформациям). Коэффициент приведения толщины ГП из стали 10ХСНД к стали Ст3 с учетом механических характеристик сталей можно в данном случае определить по формуле

$$\xi = \frac{(\sigma_y + \sigma_{us})_1 (\delta_p)_1}{(\sigma_y + \sigma_{us})_2 (\delta_p)_2},$$

где индексы 1 и 2 относятся к характеристикам стали 10ХСНД и Ст3 соответственно; δ_p – относительное равномерное удлинение. Тогда коэффициент $\xi = 1,28$, а приведенная толщина ГП из стали 10ХСНД будет равна 3,84 мм.

Тротиловый эквивалент зарядов из пластического ВВ для условий контактного и близкого неконтактного подводного взрыва определялся по формуле, предложенной в [36]:

$$\beta_{\text{ТНТ}} = \frac{q_{\text{ВВ}} \rho_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}}{q_{\text{ТНТ}} \rho_{\text{ТНТ}} D_{\text{ТНТ}}}.$$

В соответствии с этим для зарядов, использованных при испытаниях макетов второй группы, $\beta_{\text{ТНТ}} = 0,85$.

Исходя из количества варьируемых параметров и анализа размерностей, а также принимая мультипликативную форму для уравнения регрессии, зависимость максимального остаточного прогиба ГП от варьируемых параметров можно представить в виде

$$\frac{w_3}{s_3} = A \left(\frac{b_1}{b_0} \right)^{-0,13} \left(\frac{s_3}{\sqrt[3]{Q}} \right)^\alpha \left(\frac{b_0}{\sqrt[3]{Q}} \right)^\beta \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^\gamma \left(\frac{\ell}{h} \right)^\eta.$$

В данной зависимости учтен полученный выше показатель степени «-0,13», характеризующий влияние ширины ВК.

На основе обработки экспериментальных данных испытаний макетов 1-й и 2-й групп (без одного опыта в варианте 5 с $s_1 = 0,6$ мм) получены следующие значения показателей степени в регрессионном уравнении: $\alpha = -1,5$; $\beta = -1,5$; $\gamma = -0,2$; $\eta = 0,25$. На рис. 6 приведено сопоставление экспериментальных данных и аппроксимационной зависимости:

$$Y = 2380 \cdot X,$$

$$\text{где } Y = \frac{w_3}{s_3} \left(\frac{\ell}{h} \right)^{-0,25};$$

$$X = \left(\frac{b_1}{b_0} \right)^{-0,13} \left(\frac{s_3}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5} \left(\frac{b_0}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5} \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^{-0,2};$$

Q – масса заряда в тротиловом эквиваленте, г, геометрические параметры макетов – в мм. Коэффициент детерминации аппроксимационной зависимости составляет $R^2 = 0,92$.

Опыты с макетами варианта 5 показали, что уменьшение толщины НО до $s_1 = 0,6$ мм (при этом

имеет место условие $s_1 \leq s_2$) приводит к уменьшению прогиба ГП примерно на 10 %.

Учитывая, что толщина НО в рассматриваемых опытах была постоянна ($s_1 = 0,8$ мм), полученную зависимость можно записать в виде

$$w_3 = A \cdot \left(\frac{\ell}{h} \right)^{0,25} \cdot Q / (b_1^{0,13} b_0^{1,37} s_2^{0,2} s_3^{0,5}).$$

Выбирая в качестве критерия взрывоустойчивости ГП ее предельный пластический прогиб или предельную пластическую деформацию можно получить зависимость влияния параметров многопреградной конструкции на величину предельной (по указанным критериям) массы заряда:

$$Q_{\text{lim}} = A \cdot \left(\frac{h}{\ell} \right)^{0,25} b_1^{0,13} b_0^{1,37} s_2^{0,2} s_3^{0,5}.$$

Значение константы «А» будет зависеть от принятых размерностей массы заряда Q и параметров конструкции. Из формулы видно, что предельная взрывоустойчивость ГП определяется, прежде всего, ее отстоянием от НО b_0 , а также толщиной s_3 . Следует отметить, что влияние на взрывоустойчив-

Таблица 3. Размеры разрушений наружной обшивки и разделительной преграды при испытаниях макетов второй группы

Table 3. Extent of damage to outer plating and dividing barrier (2nd batch)

Вариант макета	Масса заряда ВВ, г	Радиус пробоины, мм		Примечание
		НО	РП	
1	20	47,5	77,5	
	50	110,0	105,0	
	35	80,0	107,5	
	30	52,5	95,0	
2	30	166,0	131,0	
	35	–	160,0	
3	30	140,0	185,0	
	40	169,0	190,0	
5	35	85,0	115,0	Толщина НО $s_1 = 0,8$ мм
	35	113,0	105,0	Толщина НО $s_1 = 0,6$ мм
6	30	95,0	110,0	Пробоина для первой РП; поскольку вторая РП не разрушалась, ширина БК b_2 принималась между первой и второй РП
	40	110,0	115,0	
7	30	95,0	120,0	То же
	40	110,0	125,0	
10	40	185,0	180,0	То же
	50	192,0	185,0	
11	40	75,0	110,0	

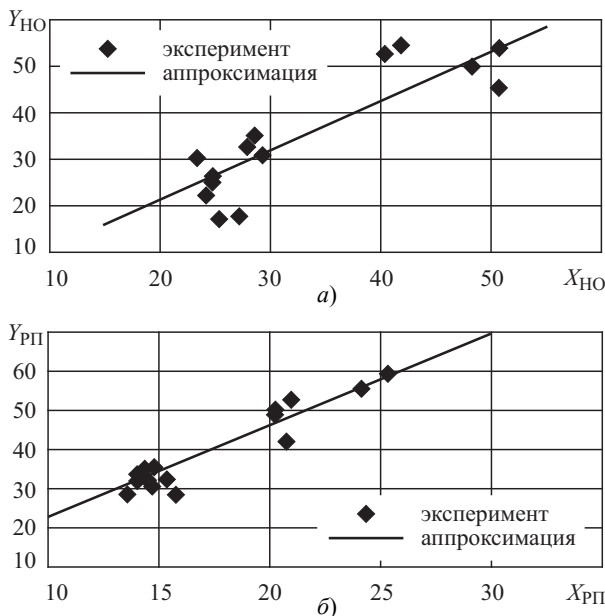


Рис. 7. Влияние параметров многопреградной конструкции на размер пробоины в наружной обшивке (а) и разделительной преграде (б)

Fig. 7. Influence of multiple-barrier structure parameters on size of penetration hole in outer plating (a) and in dividing barrier (b)

ляемость размеров ГП в плане получено на основе варьирования длины преграды, поэтому при варьировании высоты показатель степени отношения h/l может быть несколько иным.

Одной из характеристик взрывосопротивляемости, представляющих интерес для многопреградных конструкций в связи с наличием БК, является размер пробоины в НО и РП. Для анализа влияния на размер пробоин параметров многопреградных конструкций, а также массы заряда ВВ использовались результаты испытаний макетов второй группы, которые приведены в табл. 3. Как отмечалось выше, размер пробоины определялся «в свету» без учета отдельных разрывов. Если форма пробоины заметно отличалась от круга, то измерялась площадь пробоины S , а ее радиус находился по формуле $r = \sqrt{S/\pi}$.

Исходя из варьируемых параметров и анализа размерностей зависимости для радиусов пробоины в НО $r_{НО}$ и РП $r_{РП}$ принимались в виде

$$\frac{r_{НО}}{\sqrt[3]{Q}} = A \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{s_1} \right)^\alpha \left(\frac{b_1}{\sqrt[3]{Q}} \right)^\beta$$

$$\text{и } \frac{r_{РП}}{\sqrt[3]{Q}} = B \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{s_1 + s_2} \right)^\alpha \left(\frac{b_1}{\sqrt[3]{Q}} \right)^\beta \left(\frac{b_2}{b_0} \right)^\gamma.$$

На основе анализа экспериментальных данных получены следующие значения показателей степени: $\alpha = 0,5$; $\beta = 1$; $\gamma = 0,5$. На рис. 7 приведено сопоставление экспериментальных данных и аппроксимационных зависимостей:

$$Y_{НО} = 1,06 \cdot X_{НО} \text{ и } Y_{РП} = 2,31 \cdot X_{РП},$$

$$\text{где } Y_{НО} = \frac{r_{НО}}{\sqrt[3]{Q}}; \quad X_{НО} = \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{s_1} \right)^{0,5} \frac{b_1}{\sqrt[3]{Q}};$$

$$Y_{РП} = \frac{r_{РП}}{\sqrt[3]{Q}}; \quad X_{РП} = \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{s_1 + s_2} \right)^{0,5} \frac{b_1}{\sqrt[3]{Q}} \sqrt{\frac{b_2}{b_0}};$$

Q – масса заряда пластического ВВ, г, радиус пробоины и геометрические параметры макетов – в мм. Коэффициент детерминации зависимости для НО составил $R^2 = 0,84$, для РП – $R^2 = 0,95$. Для анализа размеров пробоины в РП использовались результаты испытаний макетов без варианта 7, в котором непосредственно за РП располагалась воздушно-пузырьковая структура. Однако можно отметить, что добавление результатов испытаний этого варианта практически не влияет на аппроксимационную зависимость.

Полученные зависимости можно представить в виде

$$r_{НО} = 1,09 \sqrt{\frac{Q}{s_1}} \frac{b_1}{\sqrt[3]{Q}} \text{ и } r_{РП} = 2,38 \sqrt{\frac{Q}{s_1 + s_2}} \frac{b_1}{\sqrt[3]{Q}} \sqrt{\frac{b_2}{b_0}},$$

где Q – масса заряда в тротильном эквиваленте.

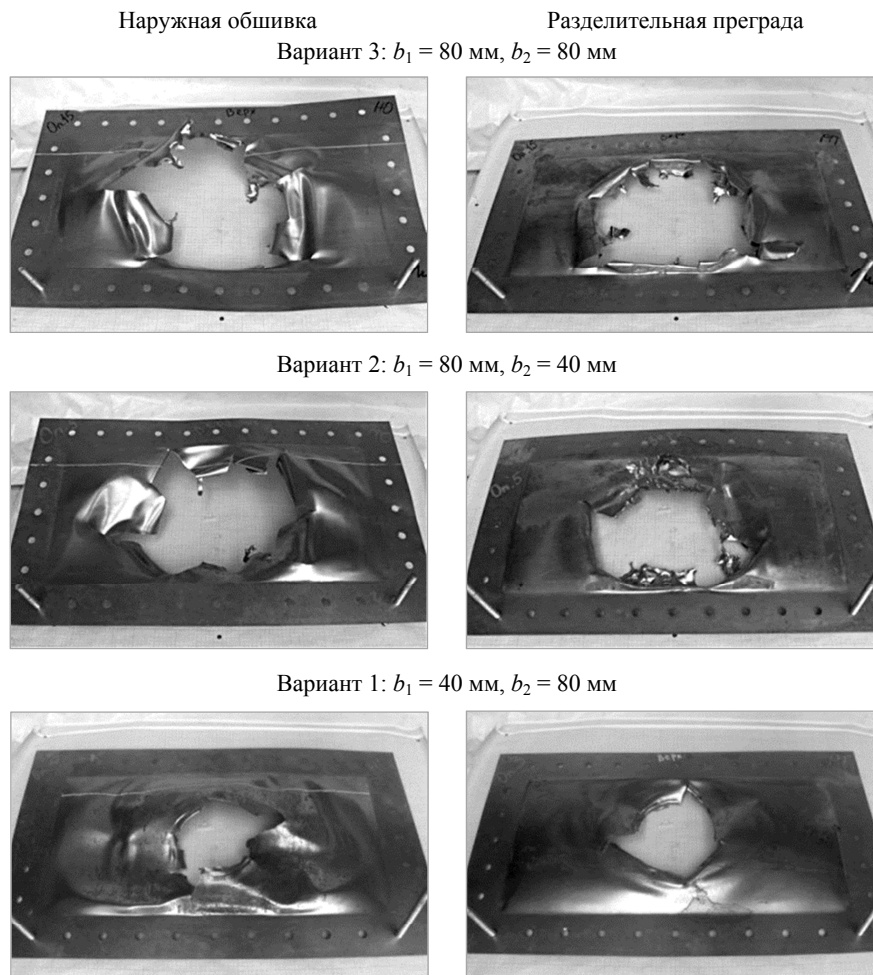
Применительно к рассмотренным экспериментальным данным радиус пробоины в НО линейно увеличивается при росте ширины ВК. С другой стороны, очевидно, что влияние ширины ВК должно постепенно ослабевать и при некоторой ширине будет отсутствовать. Исходя из анализа результатов испытаний отсутствие влияния ширины ВК будет иметь место, когда $b_1 / \sqrt[3]{Q} > 40 - 50 \text{ мм/г}^{1/3}$. В этом случае радиус пробоины в НО будет определяться по формуле

$$r_{НО} = (43,6 - 54,5) \sqrt{\frac{Q}{s_1}}. \quad (1)$$

Влияние ширины ВК и БК на радиус пробоины в РП имеет более сложный и неочевидный характер. Так, при принятых конструктивных параметрах макетов увеличение ширины ВК приводит к увеличению пробоины, что, в первую очередь, связано с действием расширяющихся в ВК

Рис. 8. Пробоина в наружной обшивке и разделительной преграде при воздействии заряда массой 30 г

Fig. 8. Penetration hole in outer plating and in dividing barrier caused by a 30 g charge



гидродинамической струи и продуктов детонации и соответствующим увеличением площади нагружения РП. Такой характер влияния ширины ВК имеет место до тех пор, пока интенсивность воздействия струи и продуктов детонации достаточна для разрушения РП. Увеличение ширины БК также приводит к увеличению пробоины, что обусловлено уменьшением влияния отраженных от ГП волн давления и потоков жидкости, действующих на РП со стороны БК. Однако при сохранении суммарной ширины ВК и БК доминирующими являются процессы в ВК, поэтому с увеличением ширины БК и соответствующим уменьшением ширины ВК размер пробоины будет уменьшаться. При достаточно большой ширине БК воздействие на РП отраженных от ГП волн давления и потоков жидкости будет отсутствовать, при этом степень влияния ширины ВК может измениться. В связи с этим следует отме-

тить, что при отсутствии жидкости в БК обычно полагается

$$r_{\text{РП}} \approx \sqrt{\frac{Q}{s_1 + s_2}}.$$

На photographиях (рис. 8) показано влияние ширины ВК и БК на размер пробоины в НО и РП. Видно, что при одинаковой ширине ВК пробоины в НО также примерно одинаковые (варианты 3 и 2), при уменьшении ширины ВК пробоина уменьшается (варианты 2 и 1). Для РП при одинаковой ширине ВК увеличение ширины БК приводит к росту пробоины (варианты 3 и 2), а при сохранении суммарной ширины ВК и БК увеличение ширины БК приводит к уменьшению размеров пробоины (варианты 2 и 1).

Представляет интерес сопоставить формулу (1) с известными авторам зависимостями для оценки радиуса пробоины для однопреградной конструк-

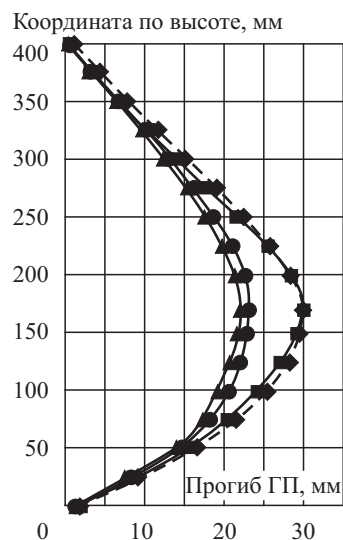
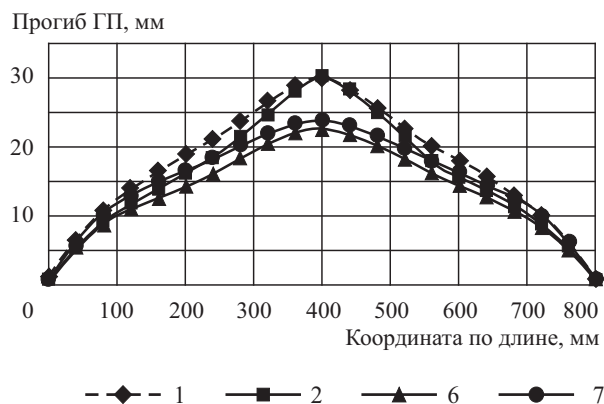


Рис. 9. Распределение прогибов главной преграды по длине и высоте (варианты 1, 2 и 6, 7, масса заряда $Q = 30$ г)

Fig. 9. Distribution of main barrier deflections over length and height (versions 1, 2 & 6, 7, charge mass $Q = 30$ g)

ции при контактном взрыве заряда ТНТ по схеме «вода – воздух». Все известные зависимости имеют вид, аналогичный формуле (1):

$$r = k \sqrt{\frac{Q}{s}},$$

где r и s – радиус пробойны и толщина преграды соответственно; k – эмпирический коэффициент.

В [28] со ссылкой на работу Кейла (А.Н. Keil) [35] приведен коэффициент $k = 70,4$ (здесь и далее коэффициент k указан для принятых в статье размерностей мм, г). В [28, 35] прямо не указывается, для каких условий взрыва получен данный коэффициент. Однако, исходя из содержания указанных работ, можно предполагать, что в данном случае не учитывается влияние расположенной над зарядом свободной поверхности воды, образующей ватерлинию. В [36] Озерецковским О.И. предложены два коэффициента: $k_B = 21,3$ – при взрыве у борта и $k_D = 24,7$ – при взрыве под днищем (отношение коэффициентов равно $k_B/k_D = 0,86$). Беляковским Н.Г. и Дульневым А.И. предложены аналогичные зависимости для оценки размеров пробойны при взрыве у борта и под днищем, в которых применительно к расчету радиуса пробойны эмпирические коэффициенты равны $k_B = 36,4$ и $k_D = 50,6$ ($k_B/k_D = 0,72$). Данные коэффициенты, а также коэффициенты в [36] получены на основе анализа разрушения натурных конструкций, изготовленных из высокопрочной стали; в частности, коэффициенты $k_B = 36,4$ и $k_D = 50,6$ соответствуют стали с характеристиками $\sigma_y = 590$ МПа, $\sigma_{us} = 660$ МПа, $\delta = 16\%$. В [36] характеристики стали не указаны.

Если учесть соотношение механических характеристик высокопрочной стали и стали Ст3 в соответствии с коэффициентом приведения в виде $\sqrt{\xi}$, обычно рекомендуемым при оценках разрушения преград, то для случая взрыва у борта коэффициент, предложенный Беляковским Н.Г. и Дульневым А.И., будет равен $k_B = 39,7$. Приняв коэффициент приведения в виде ξ , согласно настоящей статье, получим $k_B = 43,3$. Используя соотношение $k_B/k_D = 0,72$, можно привести коэффициент k из [28] к условиям взрыва у борта. Тогда будем иметь $k = 50,7$. Как видно, значения эмпирического коэффициента в формуле (1) хорошо соответствуют приведенным значениям. Несколько хуже соответствие с данными [36]. Это может быть связано с тем, что коэффициенты в [36] косвенно учитывают влияние на размер пробойны набора, подкрепляющего обшивку, и жестких (рамных) продольных и поперечных связей, способствующих ограничению размеров пробойны, а также с возможным применением высокопрочных сталей с различными механическими характеристиками и соответствующей погрешностью определения приведенных толщин преграды.

Из приведенного анализа следует, что полученные экспериментальные результаты адекватно описывают влияние ВК и БК с жидким заполнителем на размеры разрушений многопреградных конструкций.

Испытания макетов с воздушно-водяной камерой

Эффективность применения газожидкостной среды пузырьковой структуры в составе многопреградных конструкций оценивалась, в первую

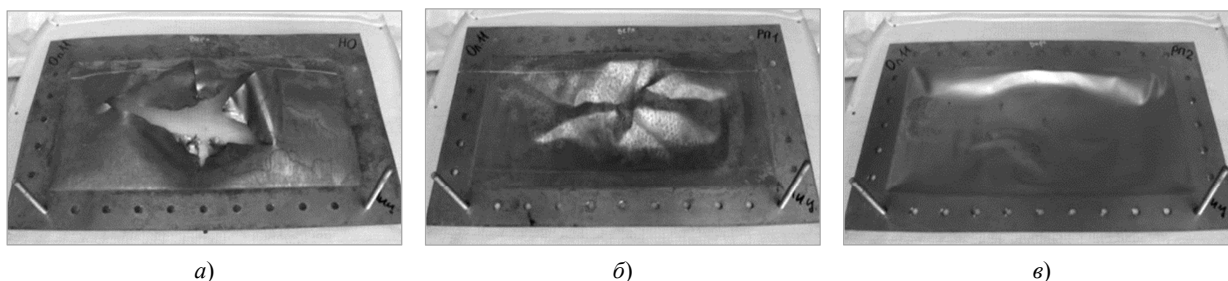


Рис. 10. Разрушение наружной обшивки и разделительной преграды при расположении воздушно-водяной камеры за наружной обшивкой (вариант 8, масса заряда $Q = 30$ г): а) наружная обшивка; б) разделительная преграда 1; в) разделительная преграда 2

Fig. 10. Damage to outer plating and dividing barrier with air/water backup to outer plating (version 8, charge mass $Q = 30$ g): а) outer plating; б) dividing barrier 1; в) dividing barrier 2

очередь, по величине максимального остаточного прогиба ГП, который, как указывалось выше, характеризует взрывсопротивляемость конструкции в целом. Такие оценки выполнялись как относительно способа размещения ВВК, так в сопоставлении с макетами, имевшими заполненные водой БК.

Для создания ВВК, как правило, требуется установка дополнительной (второй) РП. Поэтому применительно к сопоставлению результатов этих испытаний с испытаниями макетов с БК, для снижения влияния дополнительной РП на прогиб ГП, толщины НО и обеих РП были уменьшены до 0,6 мм так, что суммарная толщина данных преград составила 1,8 мм. Суммарная толщина тех же преград в макетах с БК составляла 1,6 мм. Для оценки возможного влияния неполного соответствия по суммарной толщине указанных преград были проведены сравнительные испытания зарядом массой 40 г макетов с ВВК в вариантах 6 и 11 (табл. 2). В первом случае суммарная толщина составляла 1,8 мм, во втором, как и для макетов с БК, 1,6 мм. В результате данных испытаний получена практически обратная пропорциональная зависимость прогиба от суммарной толщины: увеличение толщины с 1,6 до 1,8 мм приводит к уменьшению прогиба примерно на 10 %.

На рис. 9 представлено сопоставление результатов испытаний макетов вариантов 6, 7 (с расположением ВВК за или впереди БК) и 1, 2. Как видно, замена части БК (или ВК) на ВВК приводит к уменьшению прогиба примерно на 20–25 % (или с учетом отмеченного выше влияния суммарной толщины преград на 18–23 %). При этом отметим, что расположение ВВК относительно БК практически мало влияет на максимальный прогиб ГП (разница составляет не более 5 %).

Оценку влияния постепенной замены ВК и БК на ВВК можно получить из сравнения результатов испытаний вариантов 7, 8 и 9 (табл. 2). Максимальный прогиб ГП в опытах с зарядом 30 г составил 23,7, 22,8 и 24,2 мм соответственно, т.е. различие всего около 5 %. Таким образом, независимо от ширины ВВК ее наличие позволяет обеспечить взрывсопротивляемость ГП примерно на одинаковом уровне. В связи с этим представляет интерес сравнить результаты испытаний макетов в вариантах 9 и 4, когда по всей ширине от НО до ГП расположена ВВК либо это пространство заполнено водой соответственно. В таких условиях применение ВВК позволяет резко уменьшить максимальный прогиб, в частности при взрыве заряда массой $Q = 30$ г примерно в 1,75 раза (с учетом влияния суммарной толщины преград в 1,6 раза).

Применение ВВК вместо ВК за наружной обшивкой существенно изменяет картину разрушения НО и РП, что видно из сравнения фотографий, приведенных на рис. 8 и 10. При испытаниях макета с ВВК в варианте 8 (рис. 10) в НО отсутствует четко выраженная пробоина, а разрушение имеет вид разрывов. Общий прогиб целой части НО – наружу. Первая РП практически не имеет разрушений, за исключением небольшой пробоины от осколка в средней части. Вторая РП полностью сохранила герметичность. Общий прогиб обеих РП – внутрь. Аналогичный характер разрушений НО и РП имеет место при расположении за НО камеры, заполненной водой (вариант 4). Однако в этом случае воздействие на ГП существенно более интенсивное и, соответственно, ГП получает больший прогиб: в варианте 8 – 22,8 мм; в варианте 4 – 42,5 мм.

Эффективность применения ВВК сохраняется и при увеличении суммарного расстояния от НО до ГП (варианты 3 и 10). В варианте 10 в обоих

опытах ($Q = 40$ и 50 г) вторая РП сохраняла герметичность, а прогиб ГП по сравнению с вариантом 3 при воздействии заряда массой $Q = 40$ г примерно на 25 % меньше.

Таким образом, экспериментально показано, что наличие ВВК в составе многопреградных конструкций позволяет существенно уменьшить размеры разрушений преград, а максимальный прогиб ГП – не менее чем на 20 %, при этом по сравнению с полным заполнением пространства от НО до ГП водой – более чем в 1,5 раза. Можно предполагать, что примерно такое же отношение будет иметь место при увеличении предельной для ГП массы заряда.

Заключение

Conclusion

В статье представлены результаты экспериментальных исследований взрывоспротивляемости макетов многопреградных конструкций применительно к условиям воздействия контактного подводного взрыва у борта. Конструкции имели в своем составе воздушную камеру и камеру с заполнителем, в качестве которого использовалась вода либо двухфазная газожидкостная среда пузырьковой структуры. Получены экспериментальные данные, характеризующие основные физические процессы, обуславливающие характер разрушения и деформирования преград.

Применительно к макетам с воздушной камерой и камерой, заполненной водой, получены экспериментальные зависимости влияния основных конструктивных параметров многопреградных конструкций на размеры разрушения наружной обшивки и разделительной преграды, а также на максимальный прогиб главной преграды, который может служить оценкой предельной взрывоспротивляемости конструкции в целом. Показано, что основными факторами, определяющими максимальный прогиб главной преграды, являются отстояние этой преграды от наружной обшивки и ее толщина. Увеличение ширины воздушной камеры также способствует уменьшению прогиба. Однако при соотношении ширины воздушной камеры и камеры с водой более 0,15 оно малозначительно. Предложены и обоснованы эмпирические зависимости, определяющие размер разрушения (пробоины) наружной обшивки и разделительной преграды, при наличии достаточно близко расположенной за наружной обшивкой камеры, заполненной водой. Экспериментально показано, что применение в составе многопреградных конструкций двухфазной газожид-

костной среды пузырьковой структуры позволяет в условиях контактного подводного взрыва существенно уменьшить размеры разрушений преград.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании многопреградных систем, эффективно сопротивляющихся подводному взрыву, а также для верификации расчетных моделей воздействия контактного подводного взрыва на корпусные конструкции.

Библиографический список

References

1. Cole R. Underwater explosions. M.: Izd. Inostrannoi literatury, 1950 (Russian translation).
2. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967. [Zamyshlyayev B.V., Yakovlev Yu.S. Dynamic loads caused by underwater explosion. L.: Sudostroenie, 1967. (in Russian)].
3. Swisdak M.M. Explosion effects and properties. Part II – explosion effects in water // NSWC/WOL TR 76-116 NSWC, 1978.
4. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. [Kedrinsky V.K. Explosion hydrodynamics: experiment and models. Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2000. (in Russian)].
5. Geers T.L., Hunter K.S. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble // J. Acoust. Society of America. 2002. 111(4). P. 1584–1601.
6. Schneider N.A. Prediction of surface ship response to severe underwater explosions using a virtual underwater shock environment. (Thesis). Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2003.
7. Park I.K. et al. Measurement of naval ship responses to underwater explosion shock loadings // Shock and Vibration. 2003. 10. P. 365–377.
8. Shin Y.S. Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion // Computers and Structures. 2004. 82. P. 2211–2219.
9. Liang C.C., Tai Y.S. Shock responses of a surface ship subjected to noncontact underwater explosions // Ocean Engineering. 2006. 33. P. 748–772.
10. Salajegheh E., Salajegheh J., Biglarkhani M. Dynamic response of spar platform subjected to far-field underwater shock // The 4th National Conference on Civil Engineering. May 2008. University of Tehran. URL: https://www.civilica.com/Paper-NCCE04-NCCE04_650.html (дата обращения: 13.06.2018).
11. Qiankun J., Gangyi D. A finite element analysis of ship sections subjected to underwater explosion // Int. J. Impact Eng. 2011. 38. P. 558–566.

12. Zhang N., Zong Z., Zhang W. Dynamic response of a surface ship structure subjected to an underwater explosion bubble // *Marine Structures*. 2014. 35. P. 26–44.
13. Langrand B., Leconte N., Menegazzi A., Millot T. Submarine hull integrity under blast loading // *Int. J. Impact Eng.* 2009. 36(8). P. 1070–1078.
14. Rajendran R., Narasimhan K. Damage prediction of clamped circular plates subjected to contact underwater explosion // *Int. J. Impact Eng.* 2001. 25(4). P. 373–386.
15. Rajendran R., Narasimhan K. Underwater shock response of circular HSLA steel plates // *Shock and Vibration*. 2000. 7(4). P. 251–262.
16. Hammond L., Grzebieta R. Structural response of submerged air-backed plates by experimental and numerical analyses // *Shock and Vibration*. 2000. 7(4). P. 333–341.
17. Rarnajeyathilagam K., Vendhan C.P. Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock // *Int. J. Impact Eng.* 2004. 30(6). P. 699–719.
18. Batra R.C., Hassan N.M. Response of fiber reinforced composites to underwater explosive loads // *Composites: Part B*. 2007. 38. P. 448–468.
19. LeBlanc J., Shukla A. Dynamic response and damage evolution in composite materials subjected to underwater explosive loading: an experimental and computational study // *Composite Structures*. 2010. 92(10). P. 2421–2430.
20. LeBlanc J., Shukla A. Response of E-glass/vinyl ester composite panels to underwater explosive loading: effects of laminate modifications // *Int. J. Impact Eng.* 2011. 38. P. 796–803.
21. Schiffer A., Tagarielli V.L. The dynamic response of composite plates to underwater blast: theoretical and numerical modelling // *Int. J. Impact Eng.* 2014. 70. P. 1–13.
22. Дульнев А.И., Неклюдова Е.А., Вайс И.Ю. Взрыво-сопротивляемость полимерных композиционных материалов при неконтактном подводном взрыве // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 2(380). С. 54–64. [Dulnev A.I., Neklyudova E.A., Vais I.Yu. Blast resistance of composite polymer materials to non-contact underwater explosions. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 2(380). P. 54–64. (In Russian)].
23. Dulnev A.I., Neklyudova E.A. Resistance of GRP samples to non-contact underwater explosion // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. 919. 012003.
24. Короткин И.М. Боевые повреждения надводных кораблей. Л.: Судпромгиз, 1960. [Korotkin I.M. Combat damage to surface ships. L.: Sudpromgiz, 1960. (in Russian)].
25. Guo-min W., Xin-tao Z., Hong D. et al. Analysis on design of U.S. aircraft carrier protection structures // *Chines J. of Ship Research*. 2011. 6(5). P. 1–6.
26. Кормилицин Ю.Н., Мельников С.Ю., Томашевский В.Т. Подводный взрыв и его взаимодействие со средами и преградами. СПб.: Наука, 2006. [Kormilitsin Yu.N., Melnikov S.Yu., Tomashevsky V.T. Underwater explosion and its interactions with media and barriers. SPb.: Nauka, 2006. (in Russian)].
27. Kong X., Wu W., Li J. et al. Experimental and numerical investigation on a multi-layer protective structure under the synergistic effect of blast and fragment loadings // *Int. J. Impact Eng.* 2014. 65. P. 146–162.
28. Zhang J., Shi X.H., Soares C.G. Experimental study on the response of multi-layered protective structure subjected to underwater contact explosions // *Int. J. Impact Eng.* 2017. 100. P. 23–34.
29. Parkin B.R., Gilmore F.R., Brode H.L. Shock waves in bubbly water. / *Mechanics. Underwater and underground explosions*. M.: Mir, 1974. pp. 152–258. (Russian translation).
30. Сузов В.С. Взаимодействие ударной волны с пузырьковым экраном // Журнал технической физики. 1999. 69(1). С. 42–48. [Surov V.S. Interaction of shock wave with bubble shield. Journal of applied physics. 1999. 69(1). P. 42–48. (in Russian)].
31. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов. СПб.: Полигон, 2002. [Gelfand B.E., Silnikov M.V. Blast effects of explosions. SPb.: Poligon, 2002. (in Russian)].
32. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Химические и физические взрывы. СПб.: Полигон, 2003. [Gelfand B.E., Silnikov M.V. Chemical and physical explosions. SPb.: Poligon, 2003. (in Russian)].
33. Коэффициент детерминации // Wikipedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_детерминации) [Coefficient of determination. Wikipedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (date of access 07.06.2018). (in Russian)].
34. Елисеева И.И. и др. Эконометрика: учебник. М.: Финансы и статистика, 2007. [Eliseeva I.I. et al. Econometrics. Hand book. M.: Finance and statistics. 2007. (in Russian)].
35. Keil A.H. The response of ships to underwater explosions // *Trans. of Society of Naval Architects and Marine Engineers*. 1961. 69. P. 366–410.
36. Озеретковский О.И. Действие взрыва на подводные объекты. М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2007. [Ozeretkovsky O.I. Explosion effects on underwater objects. M.: FGUP CNIИХМ, 2007. (in Russian)].

Сведения об авторах

Дульнев Андрей Иванович, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр».



Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-23. E-mail: A_Dulnev@ksrc.ru.

Чижевский Виталий Владимирович, ведущий инженер ОАО «ЦКБ «Лазурит». Адрес: 191036, Россия, Санкт-Петербург, Лиговский пр., 6, кор. 2, лит. А, пом. 25Н, 29Н. Тел.: 8 (812) 207-57-56. E-mail: vv_chizhevskiy@cdb-lazurit.ru.

About the authors

Andrei I. Dulnev, D. Sc., Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel: 8 (812) 415-48-23. E-mail: A_Dulnev@ksrc.ru.

Vitaly V. Chizhevsky, Leading Engineer, Lazurit Central Design Bureau. Address: Ligovsky pr. 2, A, room 25H, 29H, St. Petersburg, 191036, Russia. Tel.: 8 (812) 207-57-56. E-mail: vv_chizhevskiy@cdb-lazurit.ru.

Поступила / Received: 27.03.18
Принята в печать / Accepted: 22.08.18
© Дульнев А.И., Чижевский В.В., 2018