

УДК 620.178.7+678.067.5+623.566.5  
DOI 10.17223/19988621/47/6

А.И. Дульнев, Е.А. Неклюдова

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЗРЫВОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Рассматривается взрывоспротивляемость образцов из полимерного композиционного материала на основе стеклоткани. Приводятся результаты испытаний, характеризующие различную степень повреждения образцов при неконтактном подводном взрыве. Для более детального анализа напряженно-деформированного состояния образцов используется конечно-элементное моделирование условий испытаний.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, взрывоспротивляемость, подводный взрыв.

Материалы в составе корпусных конструкции кораблей в ходе эксплуатации могут подвергаться различным видам нагрузок, одним из которых являются высокоинтенсивные динамические нагрузки, обусловленные взрывным воздействием. В последнее время для изготовления корпусных конструкций кораблей все большее применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ). Спротивляемость этих материалов воздействию нагрузок в существенной мере зависит от применяемого армирующего материала и связующего, от способа армирования, технологии изготовления и др. Наиболее широко в настоящее время сопротивляемость ПКМ рассматривается применительно к условиям статического и квазистатического нагружения и в значительно меньшей степени – к условиям взрывного воздействия. Однако для выбора перспективных ПКМ для корпусных конструкций кораблей такие исследования представляют интерес.

В настоящей работе рассматривается сопротивляемость ПКМ при воздействии неконтактного подводного взрыва. Взрывоспротивляемость ПКМ исследовалась, в частности, в работах [1–6], при этом значительное внимание уделялось получению экспериментальных данных. В работе [1] испытания проводились в открытом водоеме, где образцы подвергались воздействию зарядов взрывчатого вещества (ВВ) различной массы. В [3, 5] для имитации подводного взрыва использовалась коническая ударная труба, в которой микрочарядом ВВ генерируется плоская подводная ударная волна. В [4, 6] для этой цели использовалась цилиндрическая труба, где ударная волна создается при помощи удара о воду тяжелого поршня. Наряду с проведением испытаний в [2–6] разрабатывались аналитические методы и компьютерные модели воздействия подводной ударной волны на ПКМ, что позволяло верифицировать результаты расчетов и получить дополнительную информацию о параметрах деформирования образцов.

Основными целями данной работы являлись:

- получение экспериментальных данных по взрывоспротивляемости образцов ПКМ из стеклопластика в условиях неконтактного подводного взрыва;
- применение методов компьютерного моделирования для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов применительно к условиям испытаний.

### Материал и образцы для испытаний

Испытывались образцы ПКМ на основе квадраксиальной стеклоткани 64009 (армирование  $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ ), производитель фирма Ahlstrom (Финляндия) и винилэфирного связующего DION FR 9300, производитель фирма Reichhold (Швеция), изготовленные методом инфузии. Были изготовлены и испытаны 4 группы образцов. В каждой группе образцы имели примерно одинаковые характеристики. Между группами они различались толщиной и соответственно поверхностной массой. Основные характеристики образцов представлены в табл. 1. Образцы представляли собой круглые пластины. Радиус пластин – 300–400 мм. Каждая пластина имела 18 отверстий для болтового закрепления. Радиус установки болтов – 250 мм.

Таблица 1

#### Основные характеристики образцов

| № группы образцов | Количество образцов | Толщина, $\delta$ , мм | Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Поверхностная масса, $m$ , кг/м <sup>2</sup> | Число слоев |
|-------------------|---------------------|------------------------|---------------------------------------|--|-------------|
| 1                 | 6                   | 7.91–8.75              | 1740–1860                             | 14.71–15.23                                  | 10          |
| 2                 | 5                   | 7.36–7.40              | 1960–1990                             | 14.49–14.69                                  | 10          |
| 3                 | 5                   | 5.18–5.20              | 1970–2000                             | 10.20–10.40                                  | 7           |
| 4                 | 5                   | 3.66–3.75              | 1990                                  | 7.28–7.46                                    | 5           |

#### Постановка эксперимента

Испытания проводились во взрывной камере ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Схема взрывной камеры представлена на рис. 1, а.

Испытания образцов проводились по схеме «вода – воздух», т.е. с противоположной взрыву стороны располагалось пространство, заполненное воздухом. Во всех опытах заряд располагался напротив центра образца на фиксированном расстоянии (300 мм), варьировалась масса заряда  $Q$  (от 8 до 90 г). Использовался заряд ВВ цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру равным 1,0, тротильный эквивалент заряда по удельной энергии взрыва равнялся  $\sim 1$ . В соответствии с зависимостями [7] расчетные параметры ударной волны, действующей на образец в опытах, составляли: максимальное давление на фронте  $p_m = 35\text{--}85$  МПа, постоянная экспоненциального затухания  $\theta = (2.0\text{--}3.1) \cdot 10^{-2}$  мс.

Для проведения опыта собирался макет в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, б. Образец фиксировался между матричным основанием (тюбингом) и прижимной металлической планкой. Диаметр рабочего поля образца, закрепленного на матричном основании, составлял 400 мм. Собранный макет подвешивался вертикально во взрывной камере, которая заполнялась водой так, чтобы кромка воды возвышалась над верхней кромкой макета не менее чем на 1.0 м.

В процессе испытаний производилась запись деформаций на тыльной (противоположной взрыву) поверхности образца и давления взрыва в свободной воде. Тензорезисторы для записи деформаций в радиальном и кольцевом направлении устанавливались в центре образца и в разных точках окружности  $r = 125$  мм.

В результате испытаний для каждой группы образцов определялась масса заряда ВВ, соответствующая различному объему разрушений. Объем разрушений образцов оценивался по трем характерным признакам: 1 – разрушение связующего (визуально данный признак фиксировался как изменение цвета – побеление – участка образца в средней части после опыта); 2 – разрыв отдельных волокон; 3 – сквозное разрушение (образование пробойны).



**Рис. 1.** Взрывная камера и макет для испытаний в сборе: *a* – взрывная камера: *1* – макет для испытаний, *2* – заряд ВВ; *b* – схема макета для испытаний в сборе

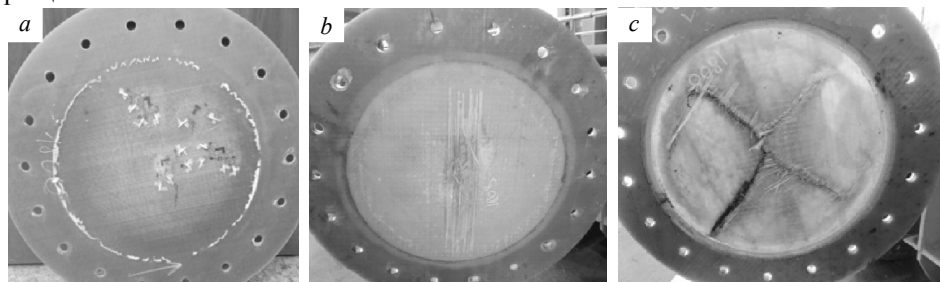
**Fig. 1.** Explosion chamber and dummy assembly: (a) explosion chamber:

*1*, dummy; *2*, explosive charge; (b) dummy assembly

В соответствии с указанными признаками устанавливались три уровня взрывопротивляемости образцов. В качестве меры взрывного воздействия для обобщения результатов испытаний образцов с различной поверхностной массой использовалась величина  $\beta = \frac{m_{\text{ВВ}}}{m}$  – относительная масса заряда ВВ, где  $m_{\text{ВВ}}$  – масса заряда ВВ на единицу рабочей площади образца, кг/м<sup>2</sup>;  $m$  – поверхностная масса образца, кг/м<sup>2</sup>. Таким образом, относительная масса заряда, при которой реализуется начало того или иного типа разрушений, является показателем удельной взрывопротивляемости образцов.

### Результаты испытаний

На рис. 2 приведены фотографии, демонстрирующие характерные признаки разрушения образцов, а в табл. 2 – полученные на основе анализа экспериментальных данных величины  $\beta$  для различных уровней взрывсопротивляемости образцов.



**Рис. 2.** Характерные виды разрушения образцов: *a* – разрушение связующего, вид на тыльную поверхность ( $Q = 8$  г,  $\beta = 0.44$  %,  $\delta = 7.32$  мм,  $m = 14.49$  кг/м<sup>2</sup>); *b* – разрыв волокон трех слоев с тыльной стороны ( $Q = 70$  г,  $\beta = 3.83$  %,  $\delta = 7.40$  мм,  $m = 14.50$  кг/м<sup>2</sup>); *c* – пробоина, вид на лицевую поверхность ( $Q = 55$  г,  $\beta = 4.20$  %,  $\delta = 5.20$  мм,  $m = 10.40$  кг/м<sup>2</sup>)

**Fig. 2.** Typical damage patterns of the samples: (a) binder failure at  $Q = 8$  g,  $\beta = 0.44$  %,  $\delta = 7.32$  mm,  $m = 14.49$  kg/m<sup>2</sup> (a rear side view); (b) disruption of the fibers of three layers at  $Q = 70$  g,  $\beta = 3.83$  %,  $\delta = 7.40$  mm,  $m = 14.50$  kg/m<sup>2</sup> (a rear side view); (c) shot hole at  $Q = 55$  g,  $\beta = 4.20$  %,  $\delta = 5.20$  mm,  $m = 10.40$  kg/m<sup>2</sup> (a front side view)

Таблица 2

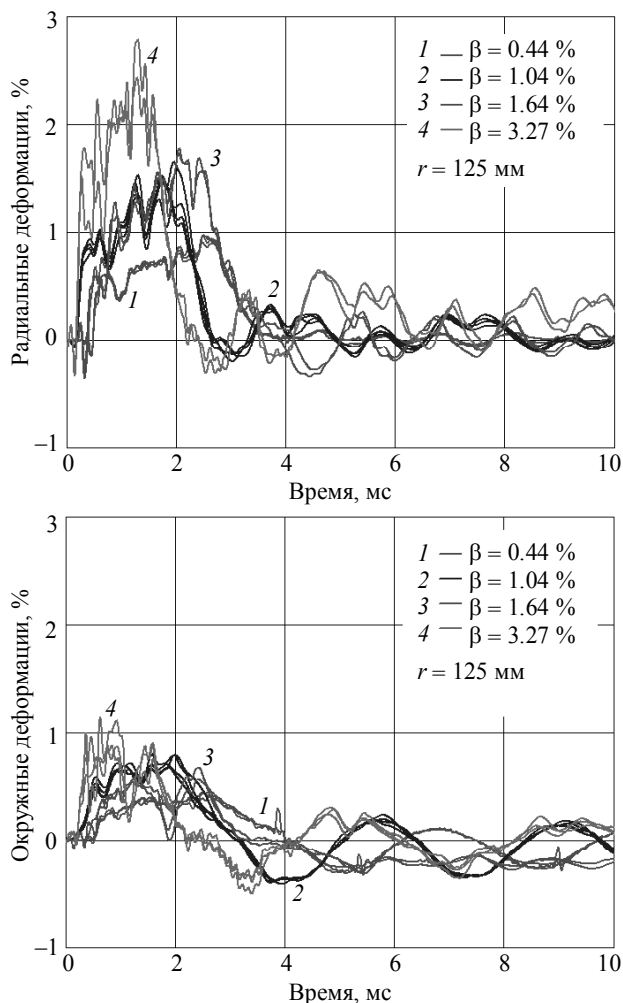
#### Взрывсопротивляемость испытанных групп образцов

| № группы образцов | Поверхностная масса, кг/м <sup>2</sup> | Относительная масса заряда $\beta$ для различных уровней взрывсопротивляемости, % |                |                |
|-------------------|--|---|----------------|----------------|
|                   |  | $\beta_1$   | $\beta_2$      | $\beta_3$      |
| 1                 | 14.71–15.23                            | $\approx 0.52$  | $\approx 3.13$ | $\approx 4.38$ |
| 2                 | 14.49–14.69                            | $\leq 0.44$   | $\approx 3.27$ | $> 3.83$       |
| 3                 | 10.20–10.40                            | $\leq 0.62$   | $\approx 3.50$ | $\approx 3.85$ |
| 4                 | 7.28–7.46                              | $\leq 0.87$   | $\approx 3.77$ | –              |

По мере увеличения мощности взрывного воздействия (массы заряда ВВ) сначала происходит разрушение связующего в центре и в районе опоры образца, которое постепенно распространяется на все рабочее поле. Затем формируется разрыв отдельных волокон в средней части, начиная с тыльного слоя образца. Разрывы волокон на данном этапе носят, как правило, хаотический характер. Заключительным этапом разрушения является образование пробины в виде двух пересекающихся магистральных трещин-разрывов, направленных под углом примерно  $\pm 45^\circ$  к основе армирующего материала. Удельная взрывсопротивляемость образцов всех групп, характеризующая образование пробины, примерно одинаковая; различие составляет менее 15 %, что практически находится в рамках погрешности результатов испытаний. При этом можно отметить, что при уменьшении толщины взрывсопротивляемость по признаку разрыва волокон несколько увеличивается, что, по-видимому, обусловлено более низким уровнем изгибных деформаций. Энергоемкость образцов в значительной мере определяется процес-

сом разрушения связующего до начала разрыва волокон. Так, если в целом от начала разрушения до образования пробойны удельная взрывопротивляемость образцов увеличивается более чем в 5 раз, то на этапе формирования пробойны от начала разрыва волокон это увеличение составляет только 10–40 %.

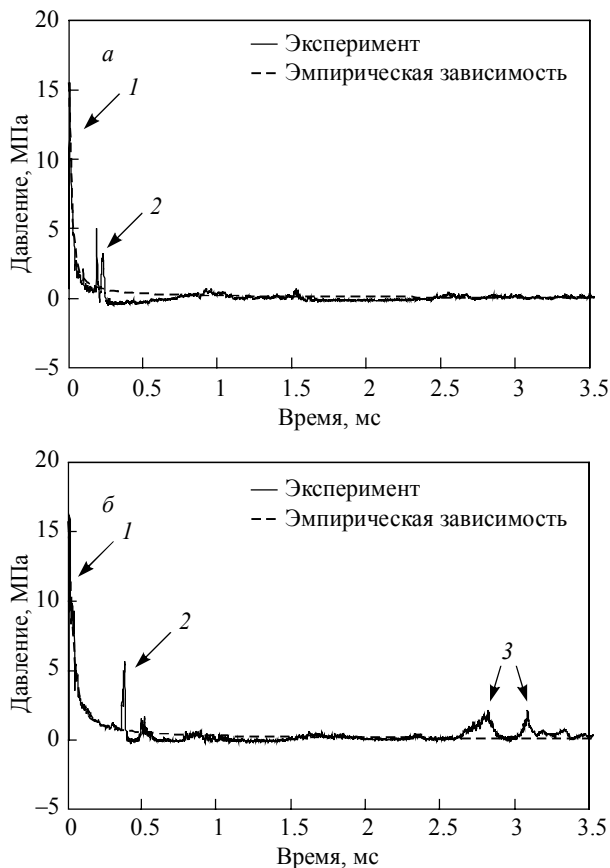
На рис. 3 представлены характерные результаты записей деформаций образцов разных групп при различном уровне воздействия  $\beta$ : 0.44 % ( $Q = 8$  г,  $\delta = 7.32$  мм); 1.04 % ( $Q = 20$  г,  $\delta = 8.75$  мм); 1.64 % ( $Q = 15$  г,  $\delta = 3.66$  мм); 3.27 % ( $Q = 60$  г,  $\delta = 7.36$  мм). Для каждого опыта на рисунке приведено показание 2–3 тензометров, расположенных в разных точках по окружности  $r = 125$  мм. В связи с результатами измерений деформаций можно отметить следующее. Время переходного процесса деформирования образцов составляет 2–4 мс. При увеличении частоты (толщины образцов) и уровня воздействия время переходного процесса уменьшается.



**Рис. 3.** Зависимости величины деформаций от времени для различного уровня взрывного воздействия  $\beta$   
**Fig. 3.** Strain as a function of time at various explosion load levels  $\beta$

Последнее связано с увеличением влияния цепных радиальных деформаций. Максимальная величина радиальных деформаций в точках измерения примерно в 2–2.5 раза больше величины окружных деформаций. При взрывном воздействии, соответствующем началу разрыва волокон ( $\beta = 3.27\%$ ), максимальная величина радиальных деформаций достигает 2.8%. При этом в центре образца, где реализуются наибольшие деформации, эта величина еще больше и превосходит предельное относительное удлинение рассматриваемого материала, которое составляет 2.6–2.8%.

На рис. 4 представлены типичные примеры записи давления во взрывной камере при испытаниях. Анализ записей давления показал отсутствие влияния волн, отраженных от стенок камеры, на параметры динамического нагружения образца.



**Рис. 4.** Экспериментальное и расчетное давление взрыва: *a* –  $Q = 8$  г, расстояние до датчика  $r = 0.62$  м; *b* –  $Q = 45$  г, расстояние до датчика  $r = 1.04$  м (*1* – фронт ударной волны, *2* – отраженная от образца волна, *3* – отраженная от стенок камеры волна)

**Fig. 4.** Experimental and analytical pressure of explosion ( $r$  is the distance to the gauge): (*a*)  $Q = 8$  g,  $r = 0.62$  m; (*b*)  $Q = 45$  g,  $r = 1.04$  m (*1*, shockwave front; *2*, the wave reflected from the sample; *3*, the wave reflected from the chamber walls)

Экспериментальная кривая давления сопоставлялась с расчетными параметрами взрыва в безграничной жидкости для заряда тротила. Расчет выполнялся в соответствии с эмпирическими зависимостями [7, 8]. Как видно из сопоставления экспериментальных и расчетных данных, в опытах имела место полная детонация заряда, а параметры взрыва хорошо соответствовали эмпирическим зависимостям для зарядов тротила. Последнее позволило далее при компьютерном моделировании условий испытаний принимать для используемых в опытах зарядов ВВ уравнение состояния продуктов взрыва в форме Джонса – Уилкинса – Ли (JWL) с эмпирическими параметрами для тротила [9].

### Компьютерное моделирование испытаний

Целью компьютерного моделирования была разработка вычислительных конечно-элементных (КЭ) моделей для прогнозирования деформирования ПКМ при воздействии подводного взрыва, а также применение этих моделей для более детального анализа НДС образцов при испытаниях. Необходимость привлечения компьютерных моделей для анализа НДС обусловлена, в том числе, ограниченными возможностями получения экспериментальной информации о процессе деформирования образца при испытаниях. В частности, в условиях близкого взрыва практически отсутствует возможность регистрации деформаций на лицевой поверхности образца, а в центре образца – даже на тыльной поверхности.

Учитывая сложность процессов при близком неконтактном подводном взрыве, моделирование условий испытаний осуществлялось с применением двух программ КЭ-моделирования: LS-DYNA и AUTODYN. В обоих случаях принималась трехмерная постановка задачи. В силу симметрии рассматривалась четверть расчетной области в виде сегмента жидкости (воды) радиусом 660–900 мм и высотой 810–1050 мм с вырезом в верхней части по контуру, размеры которого равнялись габаритным размерам тьюбинга (рис. 5). Внутри выреза располагался образец, над которым формировалась область воздуха, соответствующая свободному объему в тьюбинге за образцом. Расчетный диаметр образца принимался равным диаметру установки болтового крепления 500 мм.

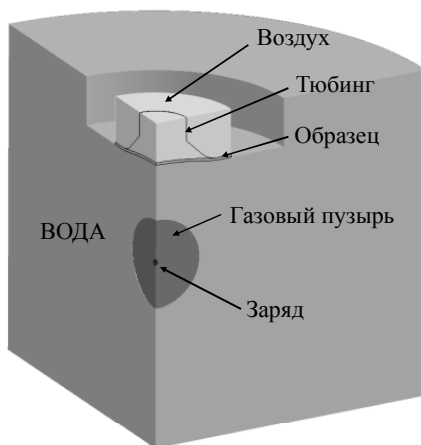


Рис. 5. Расчетная область при моделировании испытаний

Fig. 5. Computational domain in the test simulation

При моделировании в LS-DYNA и AUTODYN использовались одинаковые граничные условия и одинаковые типы КЭ. По границе области воздуха задавалось условие непротекания, по контуру, имитирующему тьюбинг – абсолютно жесткая граница и условие непротекания, по внешней границе области воды – условие свободного протекания жидкости.

В качестве граничного условия для образца принималось отсутствие перемещений в направлении, перпендикулярном его плоскости, по кольцу шириной 50 мм, что обеспечивало при расчетах такое же рабочее поле образца, как и при испытаниях. Для моделирования всех объектов – образцов, вода, воздух, ВВ, использовались КЭ типа SOLID, при этом для воды, воздуха и ВВ применялась эйлерова сетка, а для образца – лагранжева. Параметры сеток (размеры, соотношение сторон, сгущение) выбирались таким образом, чтобы они мало влияли на результаты расчета. В частности, характерный размер эйлеровой сетки для воды и воздуха в районе образца составлял примерно 4–5 мм, размер лагранжевой сетки в плоскости образца – 3.4 мм, количество элементов по толщине образца – 6.

Для воды использовалось уравнение состояния полиномиального вида. Полагалось, что давление в жидкости не может принимать отрицательных значений. Такое предположение является наиболее простым способом учета кавитационных явлений в жидкости при взрывных процессах. Воздух моделировался уравнением состояния идеального газа. Для моделирования продуктов взрыва использовалось уравнение состояния в форме JWL. Значения коэффициентов и параметры Чепмена – Жуге принимались как для тротила [9].

Стеклопластик моделировался в виде линейного изотропного материала. Для корректного сопоставления с результатами испытаний характеристики стеклопластика ( $E$ ,  $\rho$ ,  $\delta$ ) при расчетах принимались такими же, как у образца в том или ином рассматриваемом опыте. Верификация компьютерных моделей производилась по экспериментальным записям деформаций в 9 опытах. Масса заряда в опытах составляла  $Q = 8, 10, 15, 45$  и  $60$  г. На рис. 6 в качестве примера приведено сопоставление расчетных зависимостей радиальных и окружных деформаций от времени с аналогичными зависимостями, полученными экспериментально, для образца из группы 1 ( $\delta = 8.75$  мм) при взрыве заряда  $Q = 10$  г.

В целом получено хорошее соответствие между результатами расчетов и экспериментальными данными. Некоторое различие между ними, а также в сходимости решений с использованием LS-DYNA и AUTODYN, может быть связано со следующими обстоятельствами: разная точность расчета параметров взрыва при использовании LS-DYNA и AUTODYN, погрешность в моделировании граничных условий для образца, погрешность определения фактической толщины образца, неполное соответствие координат точки расчета деформаций и месторасположения тензометров.

Разработанные компьютерные модели использовались для более детального анализа НДС образцов при испытаниях. В частности, оценивались цепные и изгибные деформации (рис. 7) в центре и на опоре образца при воздействии зарядов различной массы.

Анализ результатов расчета показал, что даже для образцов, имеющих относительно большую толщину (группа 1,  $\delta = 7.91$ – $8.75$  мм), в центре реализуется высокий уровень цепных деформаций. Так, при взрыве заряда массой 60 г (примерно соответствует началу разрыва отдельных волокон) их уровень составляет около 2 %. На опоре же преобладают изгибные деформации, уровень которых значительно, в 5–7 раз, превосходит уровень цепных деформаций в этом районе.



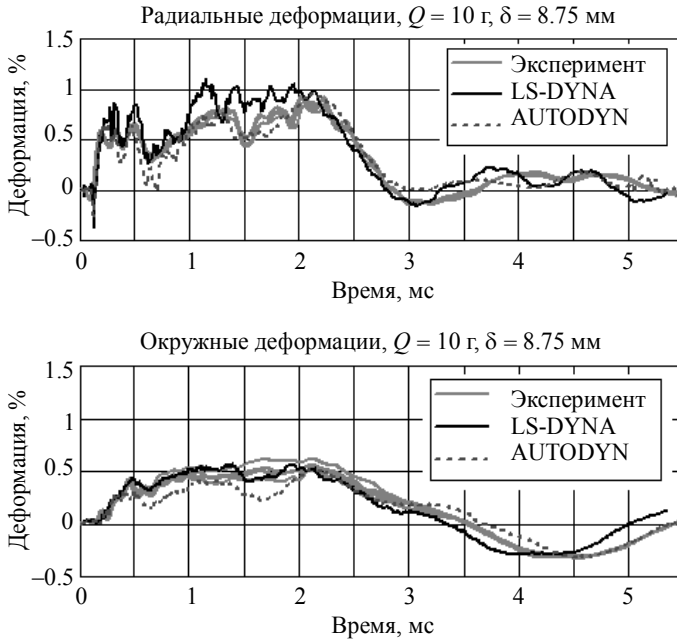


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета деформаций с экспериментом  
 Fig. 6. Comparison of the calculated strain with experimental results

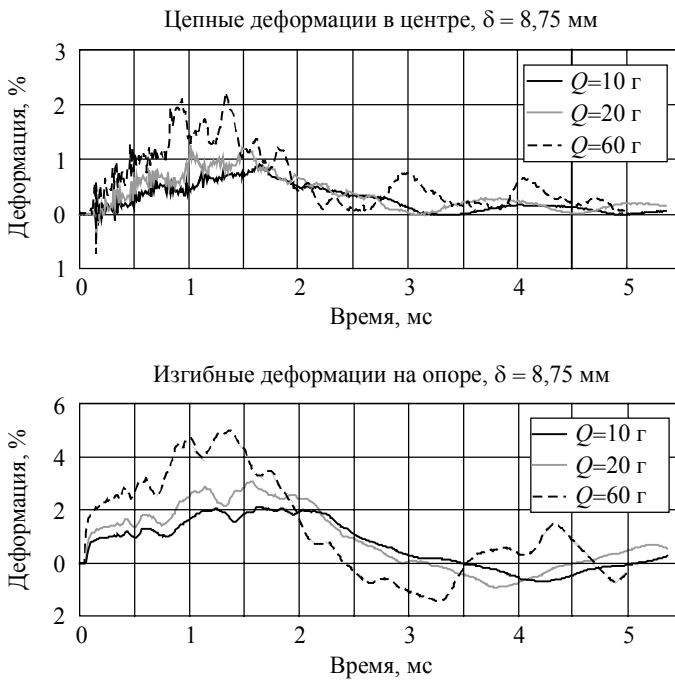


Рис. 7. Расчетные зависимости цепных и изгибных деформаций  
 Fig. 7. Analytical dependences of both chain and bending strains

В соответствии с результатами испытаний разрушение образца (разрыв волокон) начинается из центра, несмотря на то, что на опоре реализуется более высокий уровень радиальных (изгибных+цепных) деформаций. С другой стороны, если сравнивать уровень интенсивности деформаций (деформации по Мизесу), то в центре образца интенсивность деформаций примерно в 1.5–2 раза больше, чем на опоре (рис. 8). К началу разрыва волокон интенсивность деформаций в центре достигает 5 %. В связи с этим можно предполагать, что для ПКМ из стеклопластика, изготовленных методом инфузии, структура армирования которых обеспечивает квазиизотропность материала в плоскости армирования, в качестве оценки их взрывсопротивляемости (по критерию начала разрыва волокон) может быть использована величина интенсивности деформаций.



Рис. 8. Расчетные зависимости интенсивности деформаций

Fig. 8. Analytical dependences of strain intensity

### Заключение

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований взрывсопротивляемости образцов ПКМ из стеклопластика, изготовленных из квадраксимальной стеклоткани и винилэфирного связующего методом инфузии, при воздействии подводного взрыва. Испытания образцов проводились во взрывной камере ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Степень разрушения материала образцов оценивалась по трем характерным признакам: разрушение связующего, разрыв отдельных волокон, образование сквозного разрушения (пробоины). В качестве меры взрывного воздействия, соответствующего той или иной степени разрушения, принята относительная масса заряда ВВ (масса заряда на единицу рабочей площади образца, отнесенная к поверхностной массе образца). Экспериментально показано, что для рассмотренных образцов наиболее энергоемким процессом является разрушение связующего до начала разрыва во-

локон. Разработаны и верифицированы, применительно к условиям испытаний, компьютерные модели, которые позволили более детально проанализировать НДС образцов при испытаниях. На основе компьютерного моделирования, в частности, показано, что в качестве оценки взрывоустойчивости рассмотренных образцов по критерию начала разрыва волокон может быть использована величина интенсивности деформаций. Представленный опыт моделирования воздействия подводного взрыва может быть использован для анализа НДС и процесса разрушения образцов и конструкций, изготовленных из различных ПКМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mouritz A.P. The effect of underwater explosion shock loading on the fatigue behaviour of GRP laminates // *Composites*. 1995. V. 26 (1). P. 3–9.
2. Batra R.C., Hassan N.M. Response of fiber reinforced composites to underwater explosive loads // *Composites: Part B*. 2007. V. 38. P. 448–468.
3. 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. V. 92(10). P. 2421–2430.
4. Avachat S., Zhou M. Effect of facesheet thickness on dynamic response of composite sandwich plates to underwater impulsive loading // 18th International Conference on Composite Materials (ICCM18). 2011
5. LeBlanc J., Shukla A. Dynamic response of curved composite panels to underwater explosive loading: experimental and computational comparisons // *Composite Structures*. 2011. V. 93. P. 3072–3081.
6. Schiffer A., Tagarielli V.L. The dynamic response of composite plates to underwater blast: theoretical and numerical modelling // *Int. J. Impact Eng.* 2014. V. 70. P. 1–13.
7. Коул Р. Подводные взрывы. М.: ИЛ, 1950.
8. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967.
9. *Физика взрыва* / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб.: в 2 т. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

Статья поступила 28.02.2017 г.

Dul'nev A.I., Neklyudova E.A. (2017) EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL BLAST RESISTANCE ASSESSMENT OF FIBERGLASS SAMPLES. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 47. pp. 51–62

DOI 10.17223/19988621/47/6

This paper provides the underwater explosion test results for the glass-reinforced plastic (GRP) samples implemented in an explosion chamber of Krylov Science Research Centre. The test data allowed investigating the characteristics of both damage accumulation and failure of the materials considered. The extent of the damage inflicted on the material of the samples has been assessed on three parameters: binder failure, disruption of the fibers, and a shot hole formation. Experiments proved that for the samples manufactured by the infusion method, the most energy-consuming process was the failure of the binder prior to the disruption of the fibers. The computer models have been developed using two FEM-based programs (LS-DYNA and AUTODYN) followed by verification. These models allowed making a detailed assessment of the stress-strain state of the samples in the tests. It has been shown that explosion resistance of the GRP samples according to initiation of the fiber disruption can be assessed by the value of a strain intensity of the sample. The simulation results of underwater explosion effects can be used for analysis of both the stress-strain state and the failure of the constructions made of polymeric composites.

Keywords: polymeric composite, explosion resistance, underwater explosion.

NEKLYUDOVA Ekaterina Alekseevna (Engineer, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation)  
E-mail: nekludik@mail.ru

DUL'NEV Andrey Ivanovich (Doctor of Technical Science, head of laboratory in Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation)

#### REFERENCES

1. Mouritz A.P. (1995) The effect of underwater explosion shock loading on the fatigue behaviour of GRP laminates. *Composites*. 26 1). pp. 3–9.
2. Batra R.C., Hassan N.M. (2007) Response of fiber reinforced composites to underwater explosive loads. *Composites: Part B*. 38. pp. 448–468.
3. LeBlanc J., Shukla A. (2010) Dynamic response and damage evolution in composite materials subjected to underwater explosive loading: An experimental and computational study. *Composite Structures*. 92(10). pp. 2421–2430.
4. Avachat S., Zhou M. (2011) Effect of facesheet thickness on dynamic response of composite sandwich plates to underwater impulsive loading. *18th International Conference on Composite Materials (ICCM18)*.
5. LeBlanc J., Shukla A. (2011) Dynamic response of curved composite panels to underwater explosive loading: experimental and computational comparisons. *Composite Structures*. 93. pp. 3072–3081.
6. Schiffer A., Tagarielli V.L. (2014) The dynamic response of composite plates to underwater blast: theoretical and numerical modelling. *Int. J. Impact Eng.* 70. pp. 1–13.
7. Cole R. (1950) *Podvodnye vzryvy* [Underwater explosions]. Moscow: Inostrannaya Literatura.
8. Zamyshlyayev B., Yakovlev Yu. (1967) *Dinamicheskie nagruzki pri podvodnom vzryve* [Dynamic loads during the underwater explosion]. Leningrad: Sudostroenie.
9. *Fizika vzryva* [Explosion physics] (2002). Edited by L. Orlenko. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit.