

ПРЯМОЕ РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ОБЪЕКТ

В. В. Доценко, Е. Ю. Емельянова, к.т.н. М. В. Никульшин, к.т.н. О. С. Путилин, В. В. Титов

emeljanova.elena@rambler.ru

ФГУП „РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина”,

г. Снежинск

В работе представлено прямое расчетное исследование воздействия подводной ударной волны (ПУВ) на объект. Подводное взрывное нагружение происходит в результате детонации заряда 50 кг ТЭ. В качестве объекта нагружения используется модель цилиндрического корпуса конструкции.

Расчеты выполняются методом связывания независимых эйлеровой (текучая среда) и лагранжевой (структура) сеток. Текучая среда представлена в многокомпонентной формулировке: ВВ, продукты взрыва и вода. В связи с тем, что расстояние от центра заряда до объекта составляет 22 м, задача решается поэтапно с поступательным увеличением габаритных размеров расчетной сетки. На этапе детонации заряда и распространения ПУВ решение осуществляется в эйлеровой многокомпонентной формулировке на осесимметричных 2D-сетках с возрастающим размером ячейки от 1 до 5 мм. Осесимметричное решение ПУВ переносится на объемную 3D-сетку с конструкцией. Нагружаемый объект цилиндрической формы моделируется лагранжевой сеткой и имеет упругопластические характеристики материала.

Верификация расчетов осуществляется на основании аналитических и экспериментальных данных. Получена приемлемая точность результатов расчетов. Определено напряженно-деформированное состояние нагружаемого объекта.

Ключевые слова: подводная ударная волна, тротиловый эквивалент, эксперимент, аналитическая оценка, конструкция, 2D- 3D-сетки, перенос решения, амплитуда давления.

1 Расчетная конечно-элементная модель

В расчетах прочности конструкции на действие подводной ударной волны (ПУВ) общепринят подход, в котором на первом этапе моделируется взрыв в воде для получения исходных данных в виде импульсов давления. При этом конструкция представляется абсолютно жестким телом. На следующем этапе полученные импульсы давления передаются на конструкцию с целью получения его напряженно-деформированного состояния. Тем самым проводится последовательный расчет.

В данной работе предлагается подход прямого нагружения конструкции ударной волной (УВ) в результате детонации заряда 50 кг ТЭ. Конструкция располагается на расстоянии 22 м, что более чем в 100 раз превышает радиус заряда. Наибольшее нагружение цилиндрического корпуса конструкции осуществляется при действии ПУВ в поперечном направлении.

Обязательными условиями численного моделирования ПУВ являются условия сохранения энергии системы заряд ВВ – вода, сохранение сферичной формы фронта распространяющейся волны. Для этого необходима регулярная 3D-сетка с размером ячейки 1 мм. Сетка с габаритным размером, превышающим радиус заряда 50 кг ТЭ в 100 раз, состоит из $\approx 1 \cdot 10^{13}$ элементов. Такой объем КЭМ требует значительный ресурс вычислительной техники и времени.

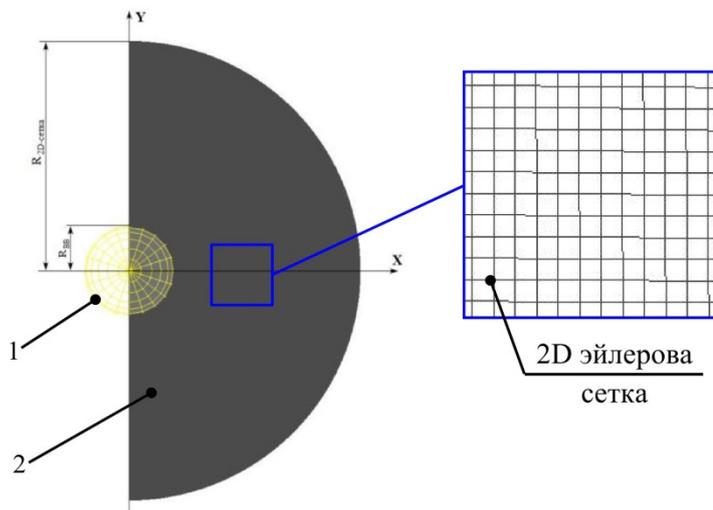
Для оптимизации численных расчетов на мелкой регулярной сетке используется „мэппинг” – техника переноса УВ с одной сетки на другую. Расчет ПУВ радиусом распространения 19 м после детонации ВВ осуществляется поэтапно на четырех 2D-сетках с поступательным увеличением их габаритов и размеров ячейки от 1 до 5 мм. Для каждой сетки на конечном шаге решения расчетные параметры ПУВ генерируются в отдельный файл, а затем переносятся на следующую более крупную сетку.

На рисунке 1 приводится эйлерова 2D-КЭМ с наименьшим габаритным радиусом 1 м. Заряд ВВ находится на оси симметрии. Детонация ВВ производится из центра заряда. Дискретизация сетки с размером ячейки 1 мм проведена 4-узловыми конечными элементами с опцией осевой симметрии. Количество элементов составляет $1.5 \cdot 10^6$. Последующее распространение ПУВ рассчитывается на 2D-сетках радиусами 1.5 м и 3 м (рисунок 2 поз.2, 3), полученных путем масштабирования первой сетки (рисунок 2 поз.1). Размеры ячеек соответственно равны 1.5 и 3 мм. Четвертая 2D-сетка имеет прямоугольную форму со стороной 21 м и состоит из $\approx 18 \cdot 10^6$ ячеек размером 5 мм (рисунок 2 поз.4). Мэппинг позволяет в 25 раз сократить количество элементов 2D-КЭМ с теми же габаритами и точностью решения.

Для описания поведения заряда ВВ используется модель материала со свойствами ТНТ [1]: плотность $\rho = 1.63 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, скорость детонации $D = 0.693 \frac{\text{см}}{\text{мкс}}$, давление Чепмена-Жуге $P_{CJ} = 0.21$ Мбар.

Продукты взрыва моделируются уравнением состояния Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) с параметрами [1]: $A = 3.712$ Мбар, $B = 0.03231$ Мбар, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, $\omega = 0.3$, начальная удельная энергия $e_0 = 0.07$ Мбар [1].

Поведение воды описывается моделью материала со следующими свойствами [1]: плотность $\rho_0 = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; скорость распространения звука в воде $C = 0.165 \frac{\text{см}}{\text{мкс}}$; параметры воды $s_1 = 1.92$; $s_2 = s_3 = 0$; коэффициент Грюнайзена $\gamma = 1$.

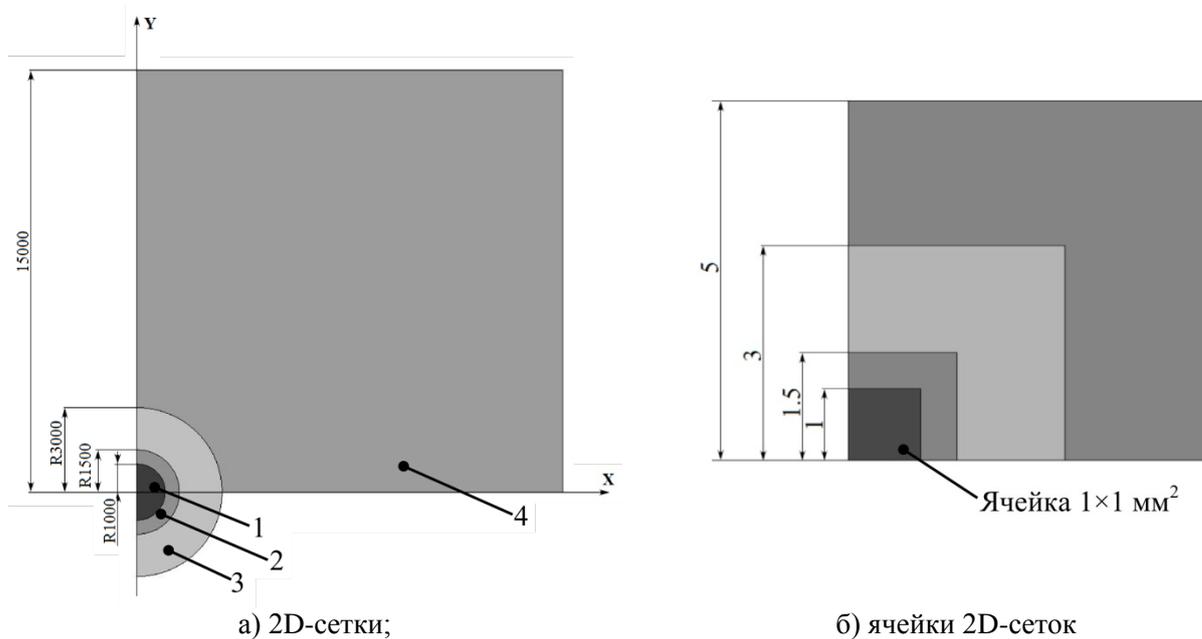


1 – заряд ВВ;

2 – вода.

Наружный радиус 2D-сетки равен $R_1 = 1$ м.

Рисунок 1 – Осесимметричная 2D-КЭМ



а) 2D-сетки;

б) ячейки 2D-сеток

1 – первая сетка $R_1 = 1$ м;

2 – вторая сетка $R_2 = 1.5$ м;

3 – третья сетка $R_3 = 3$ м;

4 – четвертая сетка $a = 21$ м;

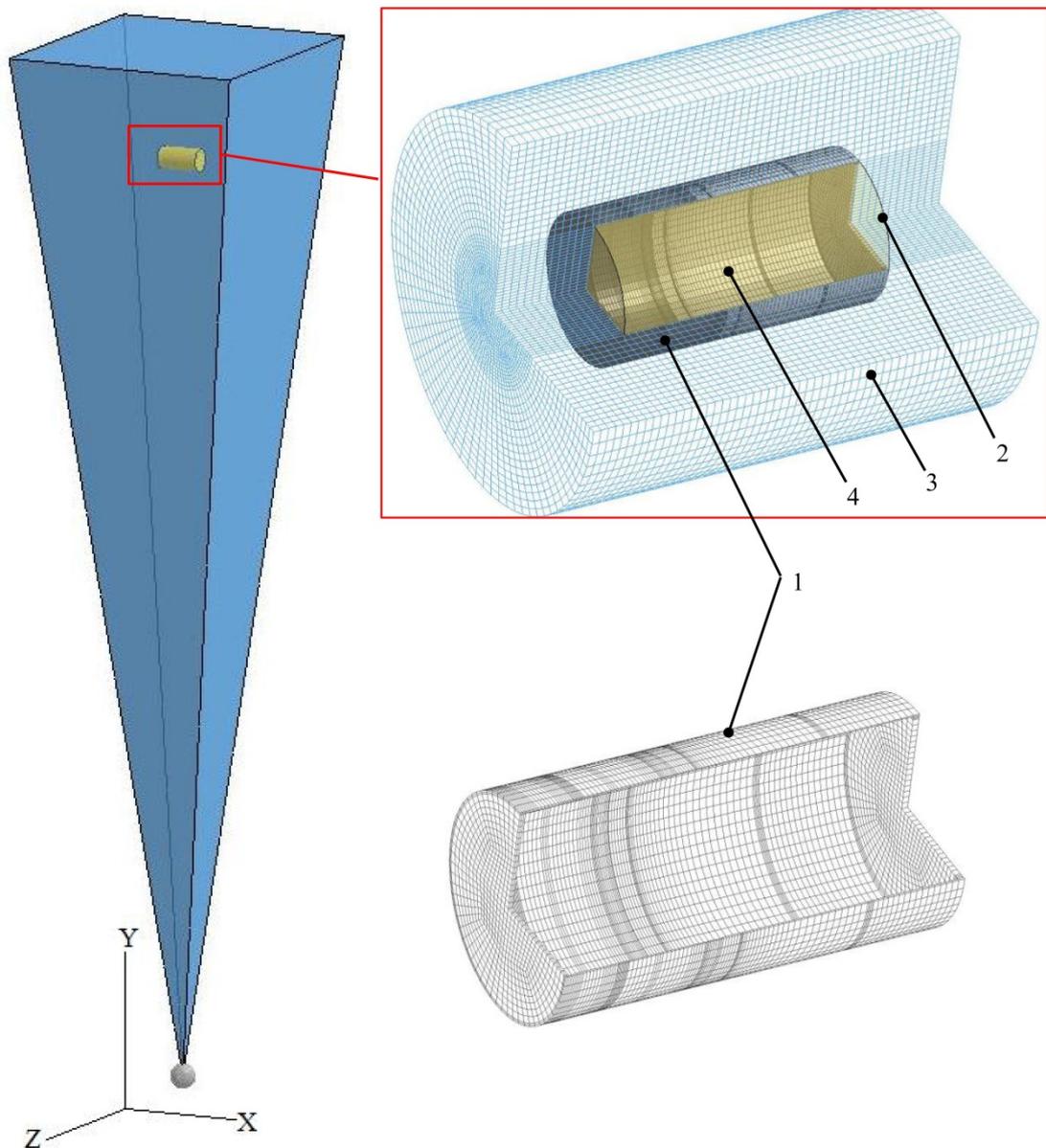
**Рисунок 2 – Осесимметричные 2D-сетки с увеличением
ячейки от 1 до 5 мм**

На рисунке 3 приводится 3D-КЭМ для прямого воздействия подводной ударной волной на цилиндрический корпус. КЭМ включает две независимые сетки – лагранжевую и эйлерову. Цилиндрическая оболочка стального корпуса моделируется лагранжевой сеткой с упругопластическими свойствами. Эйлерова сетка представлена в многокомпонентной формулировке – вода, продукты взрыва ВВ, а также добавлен воздух, равный объему нагружаемой конструкции. Наличие границы двух сред вода–воздух по наружному контуру конструкции необходимо для воздействия ПУВ на корпус. Взаимодействие ПУВ с конструкцией обеспечивается контактным взаимодействием – лагранжево-эйлерово связывание.

Эйлерова 3D-сетка выполнена в виде пирамиды высотой 25 м с квадратным основанием $0.6 \times 0.6 \text{ м}^2$. Вершина пирамиды находится в центре заряда ВВ. Размер ячейки меняется от 9 до 60 мм, в области размещения нагружаемого объекта – около 20 мм. Общее число ячеек составляет $5.3 \cdot 10^6$. Мэппинг в случае 3D-КЭМ равного габарита позволяет уменьшить количество элементов в 50 раз.

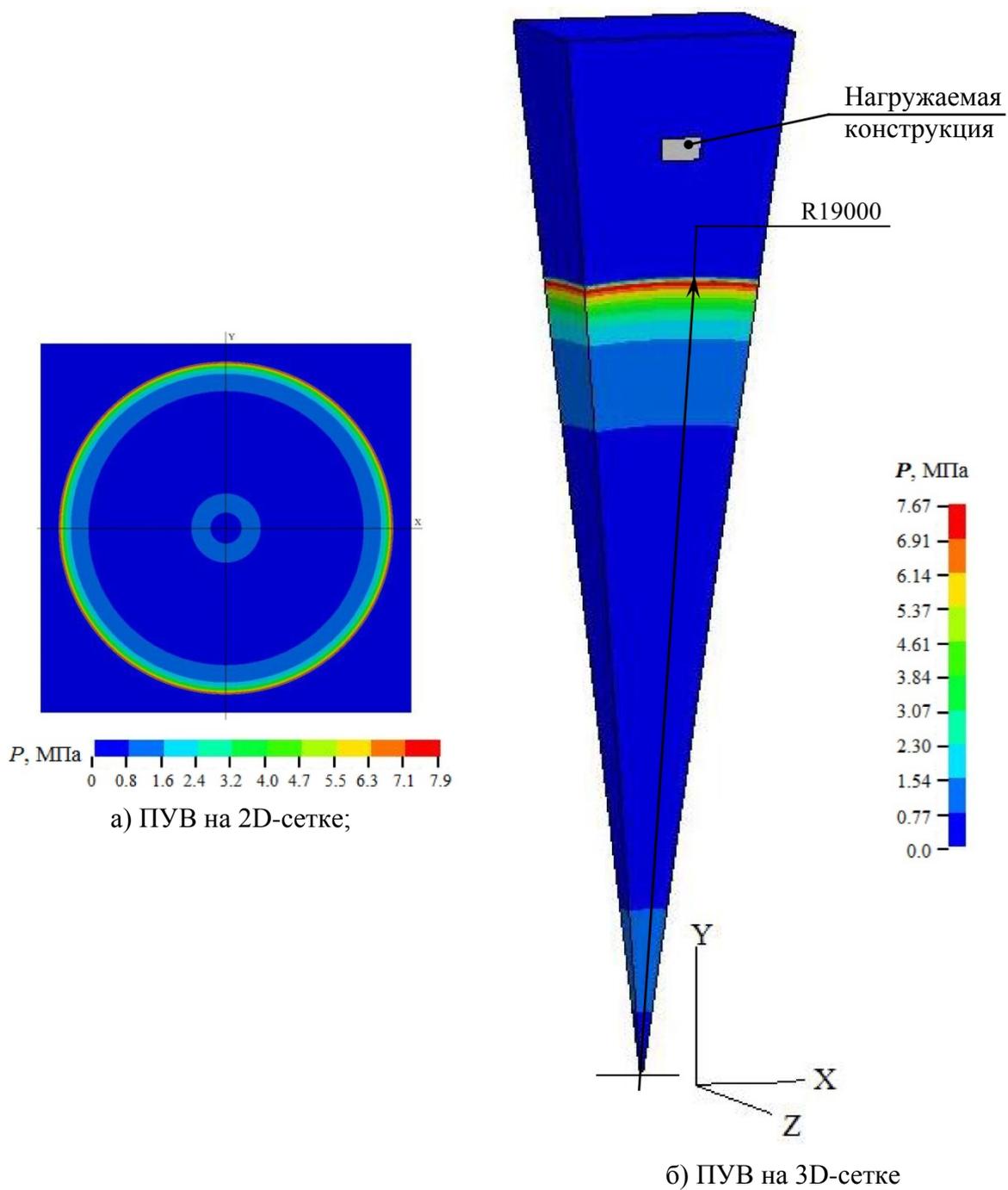
В исходных данных указывается мэппинг-вектор, который обозначает начало координат и направление оси симметрии 2D-сетки. По боковым граням и ребрам 3D-сетки задаются граничные условия симметрии в дополнительных локальных системах координат. Вершина пирамиды срезана, что позволяет избежать вырожденную форму 8-узловых элементов. Сечение среза контактирует с жесткой стенкой в виде шара радиусом 305 мм с целью предотвращения утечки текучей среды и потери энергии.

Расчет прямого воздействия ПУВ на конструкцию начинается с 11-й миллисекунды после детонации ВВ, когда радиус распространения ПУВ составляет 19 м. При этом расчетные данные сферической ПУВ, полученные в осесимметричном расчете, переносятся на 3D-сетку (рисунок 4).



- 1 – фрагмент КЭМ цилиндрического корпуса (лагранжевая сетка);
 2 – граница двух сред вода–воздух;
 3 – вода и продукты взрыва (эйлерова сетка);
 4 – воздух (эйлерова сетка)

**Рисунок 3 – 3D-КЭМ моделирования нагружения цилиндрического корпуса ПУВ.
 Независимые 3D-сетки – эйлерова и лагранжевая**

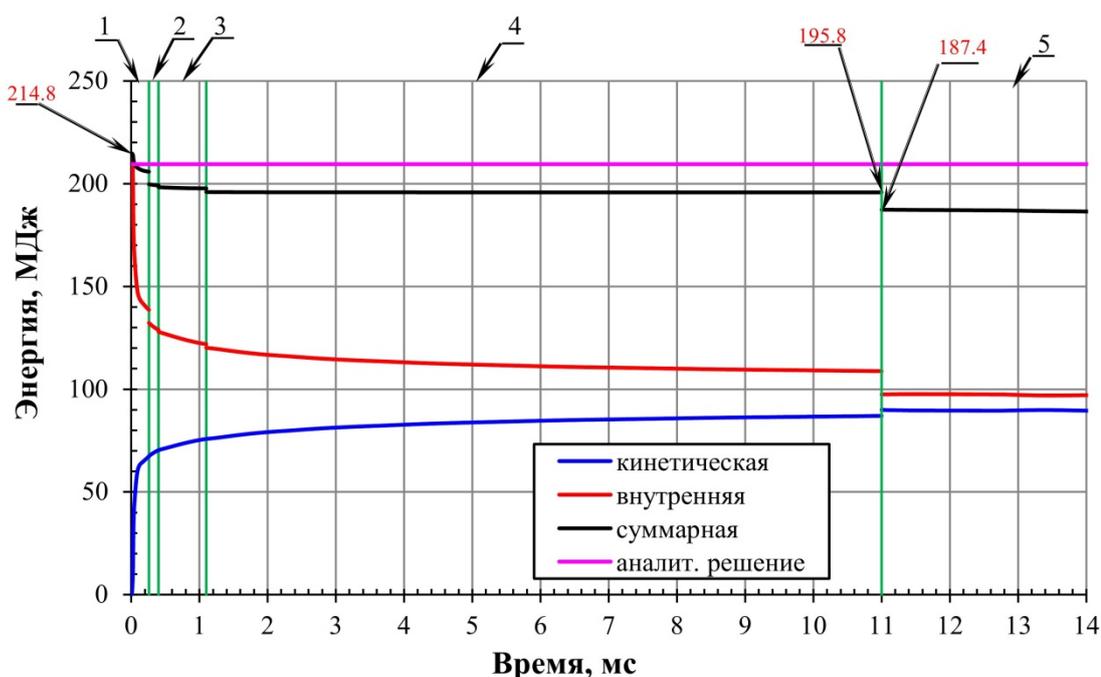


**Рисунок 4 – Мэппинг ПУВ с 2D- на 3D-сетку на 11 мс после детонации.
Распределение давления**

2 Результаты расчетов

На рисунке 5 приводятся графики изменения энергии во времени для ПУВ по результатам расчетов с применением 4-кратного мэппинга. Условие сохранения энергии выполняется (черный контур). Для 2D-сеток начальный уровень суммарной энергии на этапе детонации равен 214.8 МПа, конечный на 11 мс – 195.8 МПа. При этом среднее значение 205.2 МПа отличается от аналитического $E_{теор} = 209.5$ МДж (розовый контур) на 2%. При переходе от 2D к 3D-сетки уровень общей энергии 187.4 МПа снижается на 4%, что приемлемо.

Таким образом, проведенный численный расчет ПУВ с радиусом распространения 25 м можно считать корректным.



1–4 – решение, полученное на 2D-сетках (рисунок 2);

5 – решение, полученное на 3D сетке (рисунок 4)

Рисунок 5 – Изменение энергии при подрыве заряда 50 кг ТЭ в неограниченном объеме воды

Амплитуда давления во фронте ПУВ на расстояниях, превышающих десять радиусов заряда ВВ, определяется аналитически по формуле [2]:

$$P_{max} = 530 \left(\frac{M^{1/3}}{R} \right)^{1.09}, \quad (1)$$

где M – масса заряда ВВ, кг;

R – радиус распространения ПУВ, м.

Расчетные параметры распространяющейся ПУВ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры распространяющейся ПУВ

Распространение ПУВ			Амплитуда давления, МПа	
Время после детонации, мс	Радиус, м	Скорость, м/с	Аналитическое	Расчетное
0.26	0.79	30380	284	477
0.4	1.06	1930	206	309
1.1	2.33	1810	87.3	108.6
11.0	18.9	1670	8.9	7.9
12.6*	21.5	1625	7.5	6.7

*Момент времени соответствует началу нагружения конструкции ПУВ.

Скорость распространения фронта ПУВ по мере удаления от точки инициирования заряда снижается и стремится к скорости звука в воде 1650 м/с.

Полученное расчетное давление в ближайшей к заряду точке $P_{расч} = 6.7$ МПа на 10.7% ниже аналитического значения $P_{теор} = 7.5$ МПа и на 4% – экспериментального $P_{эксп} = 7$ МПа (рисунок 6). Отметим, что при последовательном подходе воздействия ПУВ на конструкцию было получено давление $P = 8.3$ МПа.

Расчетное значение давлений не противоречит экспериментальным данным и аналитическим оценкам, разница составляет от 3 до 4 %. Таким образом, полученные результаты указывают на приемлемую точность выбранной методики при расчетах подводного взрыва зарядов.

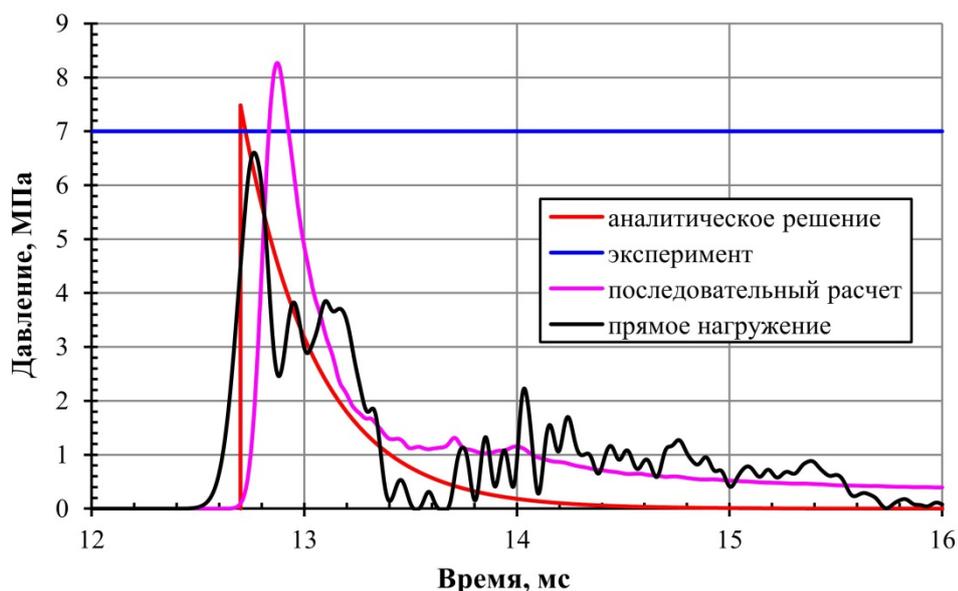
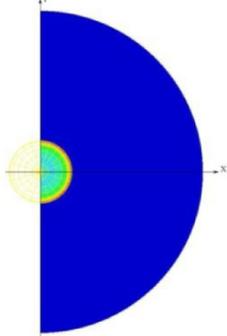
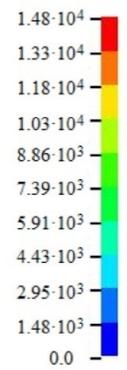
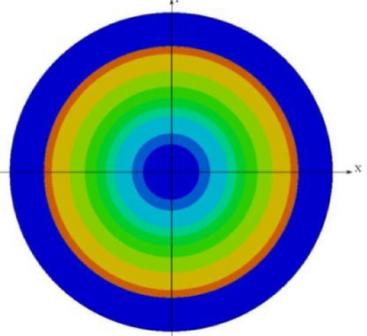
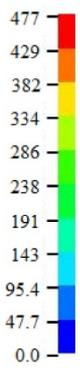
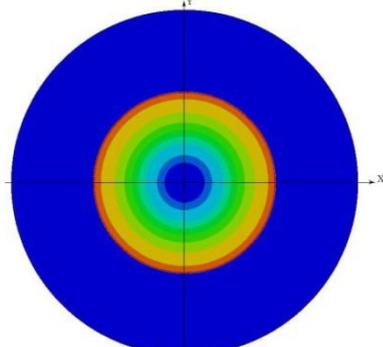
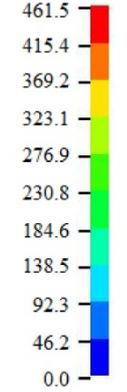
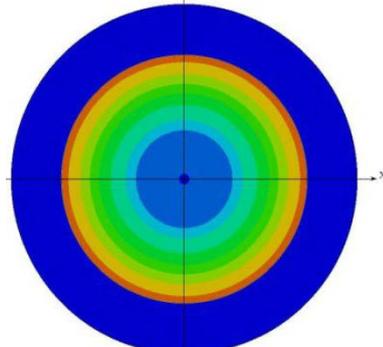
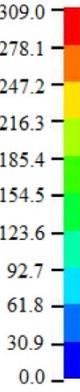
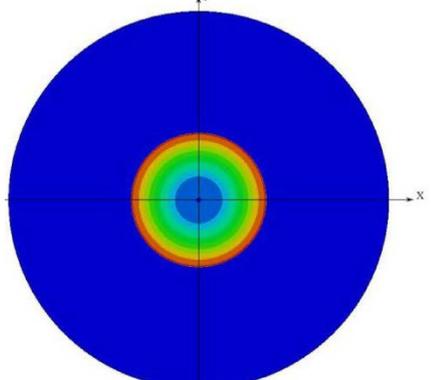
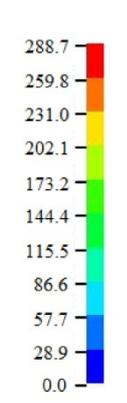
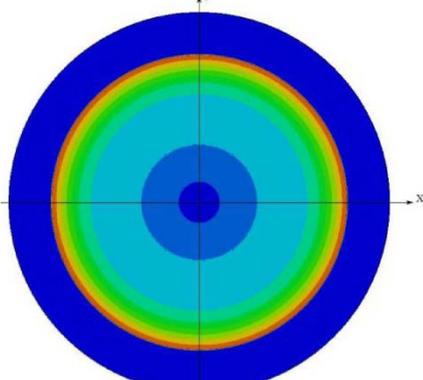
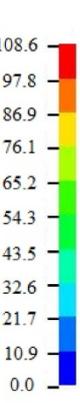
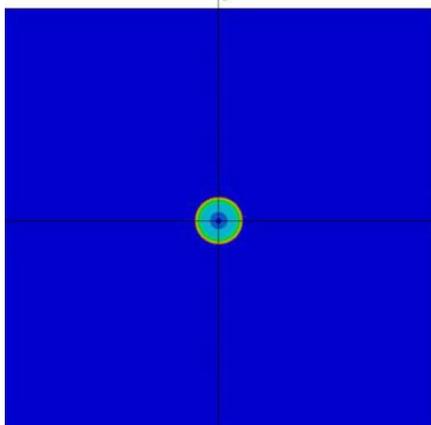
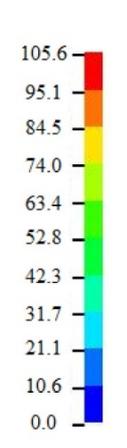
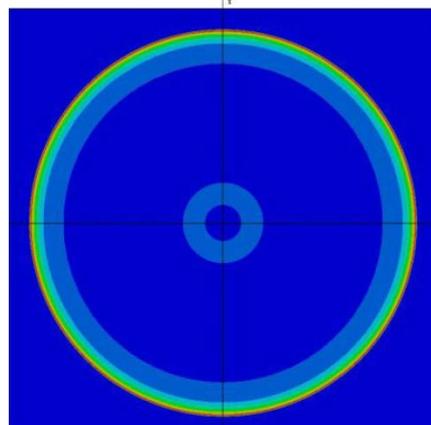


Рисунок 6 – Профили давления ПУВ

В таблице 2 приведены начальное и конечное распределения давления после взрыва заряда 50 кг ТЭ для 4-х последовательных 2D-расчетных случаев, полученных с применением мэппинга.

Следует отметить хорошее согласие давлений при переходе от одной расчетной 2D-сетки к другой. При этом наблюдается незначительное снижение значения давления. При переносе ПУВ с I сетки на II разница составила 3%, со II сетки на III – 6.6%, с III на IV – 3%.

Таблица 2 – Результаты численных расчетов 2D-ПУВ

№	R	Начальное состояние	P , МПа	Конечное состояние	P , МПа
1	Радиус 2D-сетки – 1 м	 <p>Детонация $t = 2.85 \cdot 10^{-2}$ мс</p>		 <p>$t = 0.26$ мс</p>	
2	Радиус 2D-сетки – 1.5 м	 <p>$t = 0.26$ мс</p>		 <p>$t = 0.4$ мс</p>	
3	Радиус 2D-сетки – 3 м	 <p>$t = 0.4$ мс</p>		 <p>$t = 1.1$ мс</p>	
4	Четверть 2D-сетки – 21 м	 <p>$t = 1.1$ мс</p>		 <p>$t = 11$ мс</p>	

Первоначально ПУВ приходит на конструкцию в ближайшую к заряду точку ($\varphi = -90^\circ$), затем последовательно огибает конструкцию по контуру (рисунок 7). При этом распределение давления вокруг конструкции носит неравномерный характер (рисунок 8). Максимальное значение давления $P_{\text{расч}}^{\text{max}} = 6.7$ МПа реализуется в характерной точке ($\varphi = -90^\circ$), минимальное давление $P_{\text{расч}}^{\text{min}} = 3.2$ МПа – на торцевой части цилиндра.

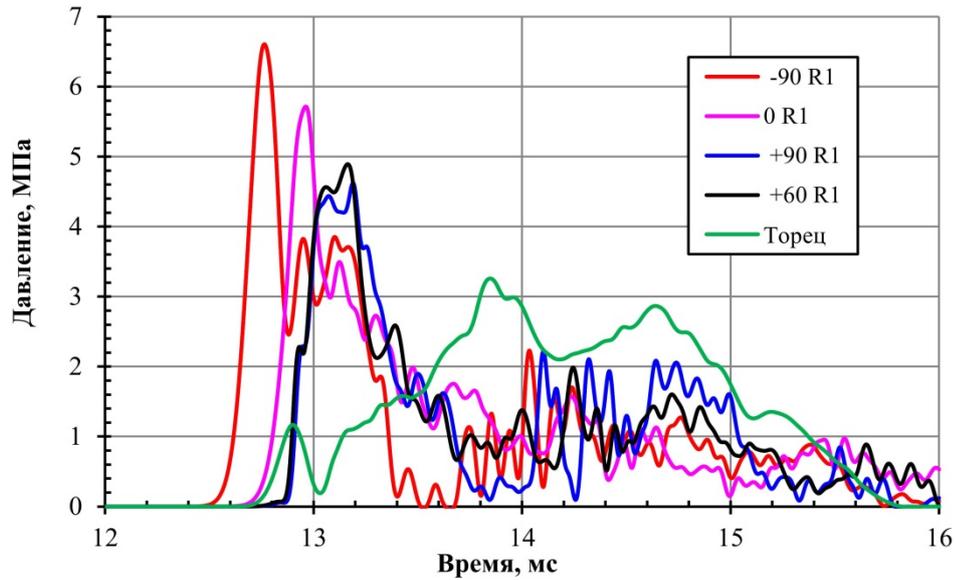
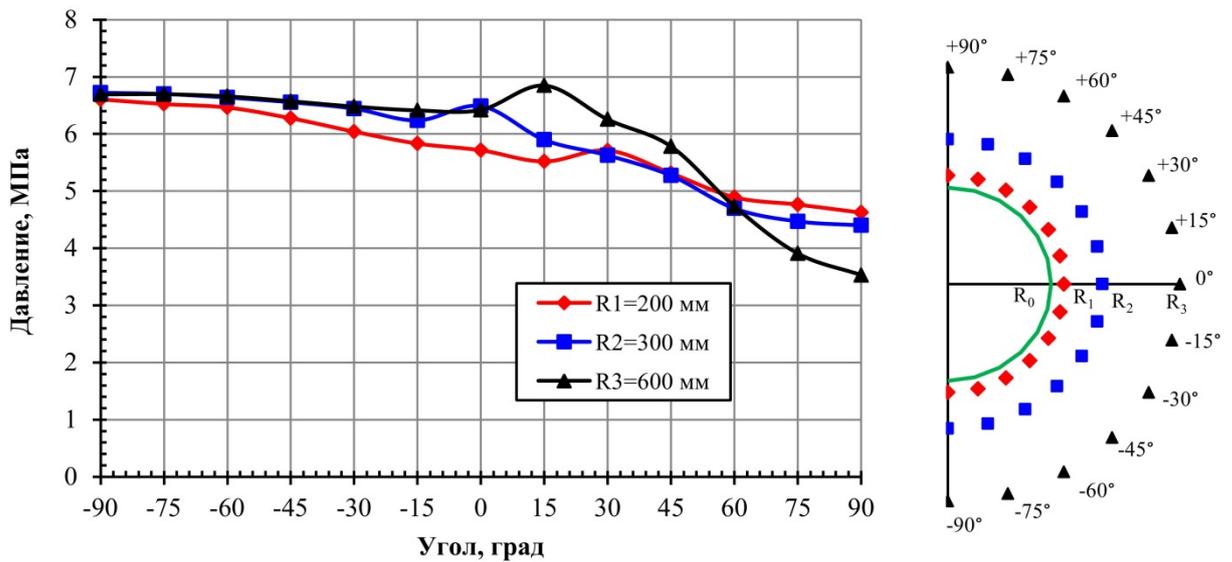


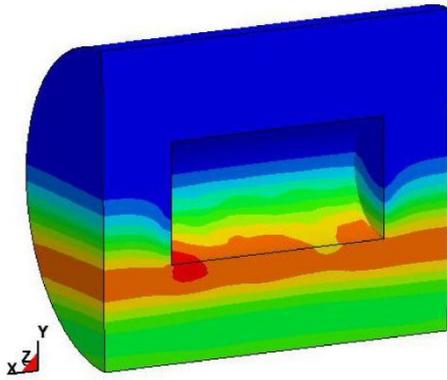
Рисунок 7 – Профили давления ПУВ



$R_0 = 267$ мм – наружный радиус цилиндрического корпуса

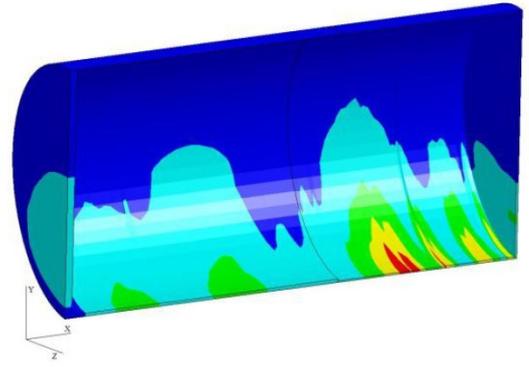
Рисунок 8 – Амплитуда давлений в характерных точках ПУВ

На рисунке 9 приводятся фрагменты воздействия подводной ударной волны на конструкцию в виде распределения давлений и соответствующие НДС самой конструкции с интервалом времени 0.2 мс.

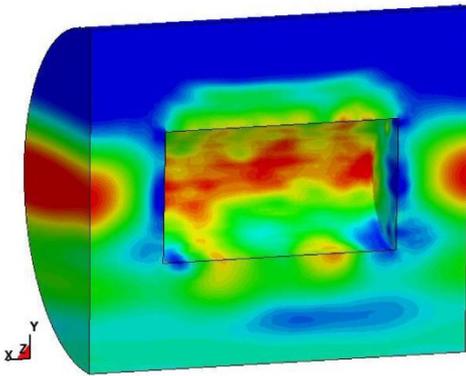


$P_{max} = 6.7$ МПа

$t = 12.8$ мс

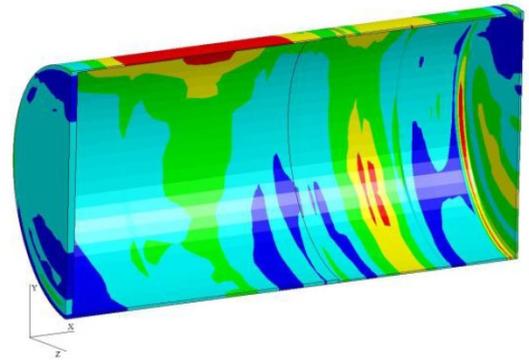


$\sigma_{\text{ЭКВ}}, \text{ МПа}$ 0 20 40 60 80 100

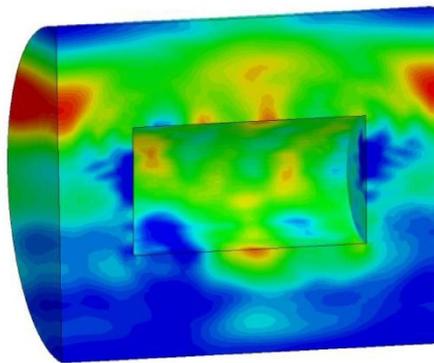


$P_{max} = 6.3$ МПа

$t = 13.0$ мс

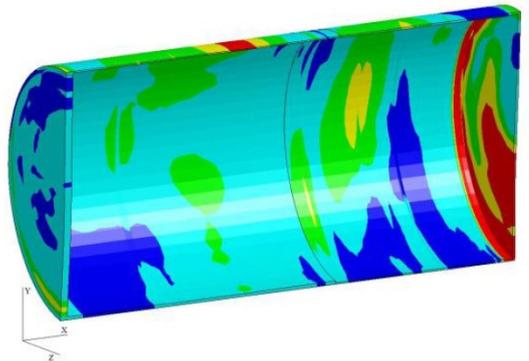


$\sigma_{\text{ЭКВ}}, \text{ МПа}$ 0 20 40 60 80 100



$P_{max} = 5.6$ МПа

$t = 13.2$ мс



$\sigma_{\text{ЭКВ}}, \text{ МПа}$ 0 20 40 60 80 100

а) ПУВ, нагружающая конструкцию;

б) НДС конструкции

Рисунок 9 – Нагружение конструкции ПУВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование прямого воздействия подводной ударной волной на конструкцию в результате детонации заряда 50 кг ТЭ на расстоянии 22 м.

Учитывая значительные расстояния распространения подводной ударной волны, в расчетах используется „мэппинг” – техника переноса УВ с одной сетки на другую. Данный подход позволяет постепенно увеличивать габарит и размерность расчетной сетки, что дает оптимальное сочетание общего количества элементов модели и размера ячейки, следовательно, возможность получать заданную точность решения и сокращать затраты вычислительного оборудования.

Полученные расчетные давления сравниваются с экспериментальными и аналитическими значениями. Результаты указывают на приемлемую точность выбранной методики.

Для прямого воздействия подводной ударной волной получена оценка напряженно-деформированного состояния нагружаемой конструкции.

Список литературы

1. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. – В 2 т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.
2. **Степанов В. Г., Шавров И. А.** Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Л., „Машиностроение” 1975 г., 280 с.

Емельянова Елена Юрьевна, инженер-исследователь, emeljanova.elena@rambler.ru, Россия, г. Снежинск, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина».

DIRECT SIMULATION OF THE UNDERWATER SHOCKWAVE EFFECT ON THE OBJECT

V.V. Dotsenko, E.Yu. Emeljanova, M.V. Nikulshin, O.S. Putilin, V.V. Titov

The work presents direct theoretical study of the underwater shockwave effect on the object. The underwater explosive loading is induced by a charge equivalent to 50 kg of TNT. The model of the item cylindrical case serves as the loaded object.

The analysis is made involving coupling of independent Eulerian (fluid medium) and Lagrangian (structure) grids. The fluid medium is made available in a multicomponent definition: high explosive, explosion products, and water. In view of the fact that the distance from the charge center to the object makes 22 m the problem has a step-by-step solution with progressively increasing overall size of the grid. When the charge is detonated and the underwater shockwave is propagated, the solution is made possible in Eulerian multicomponent definition using the axisymmetric 2D-grids having the cell size increasing from 1 to 5 mm. The axisymmetric solution of the underwater shockwave is transferred to a volumetric 3D grid with the item. The loaded cylindrical object is simulated using Lagrangian grid and is characterized by the elastoplastic properties of the material.

The computation is verified based on the analytical and experimental data. The accuracy of the obtained results is acceptable. The stress-strain behavior of the loaded object is determined.

E.Yu. Emeljanova, research engineer, Snezhinsk, Russia, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics.

Список авторов:

В. В. Доценко, Е. Ю. Емельянова, М. В. Никульшин, О. С. Путилин, В. В. Титов