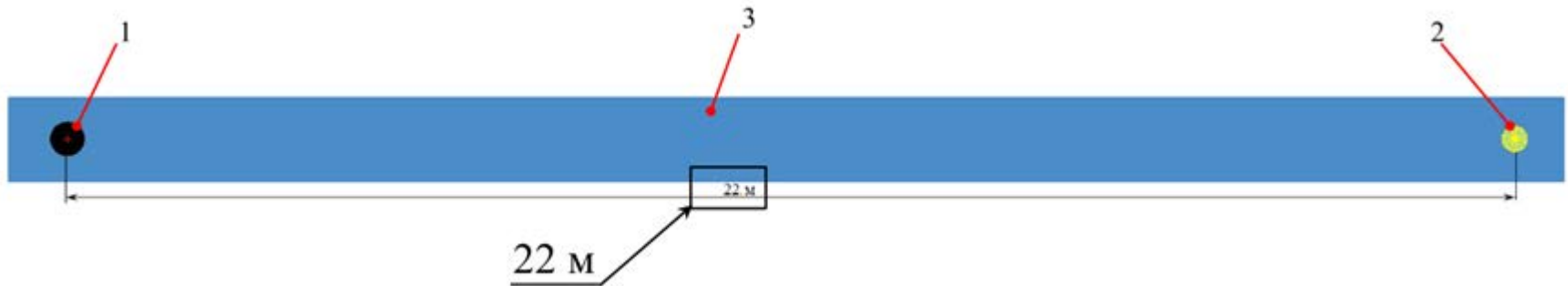


ПРЯМОЕ РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ОБЪЕКТ

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

Постановка задачи



- 1 – цилиндрический корпус конструкции $R_0 = 267$ мм;
- 2 – заряд ВВ 50 кг ТЭ $R_{ТНТ} = 194$ мм;
- 3 – вода

Аналитическое определение давления ПУВ

Амплитуда давления во фронте ПУВ на расстояниях, превышающих десять радиусов заряда ВВ, определяется аналитически по формуле [1]:

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

где M – масса заряда ВВ, кг;

R – радиус распространения ПУВ, м.

Амплитуда давления ПУВ

1. $P_{эксп} = 7.0$ МПа – эксперимент;
2. $P_{теор} = 7.5$ МПа – аналитическое значение;
3. $P_{посл.расч} = 8.3$ МПа – расчетное значение для последовательного нагружения

Материалы

Для описания поведения заряда ВВ используется модель материала со свойствами ТНТ [2]:

- плотность $\rho = 1.63 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$;
- скорость детонации $D = 0.693 \frac{\text{см}}{\text{мкс}}$;
- давление $P_{CJ} = 0.21$ Мбар.

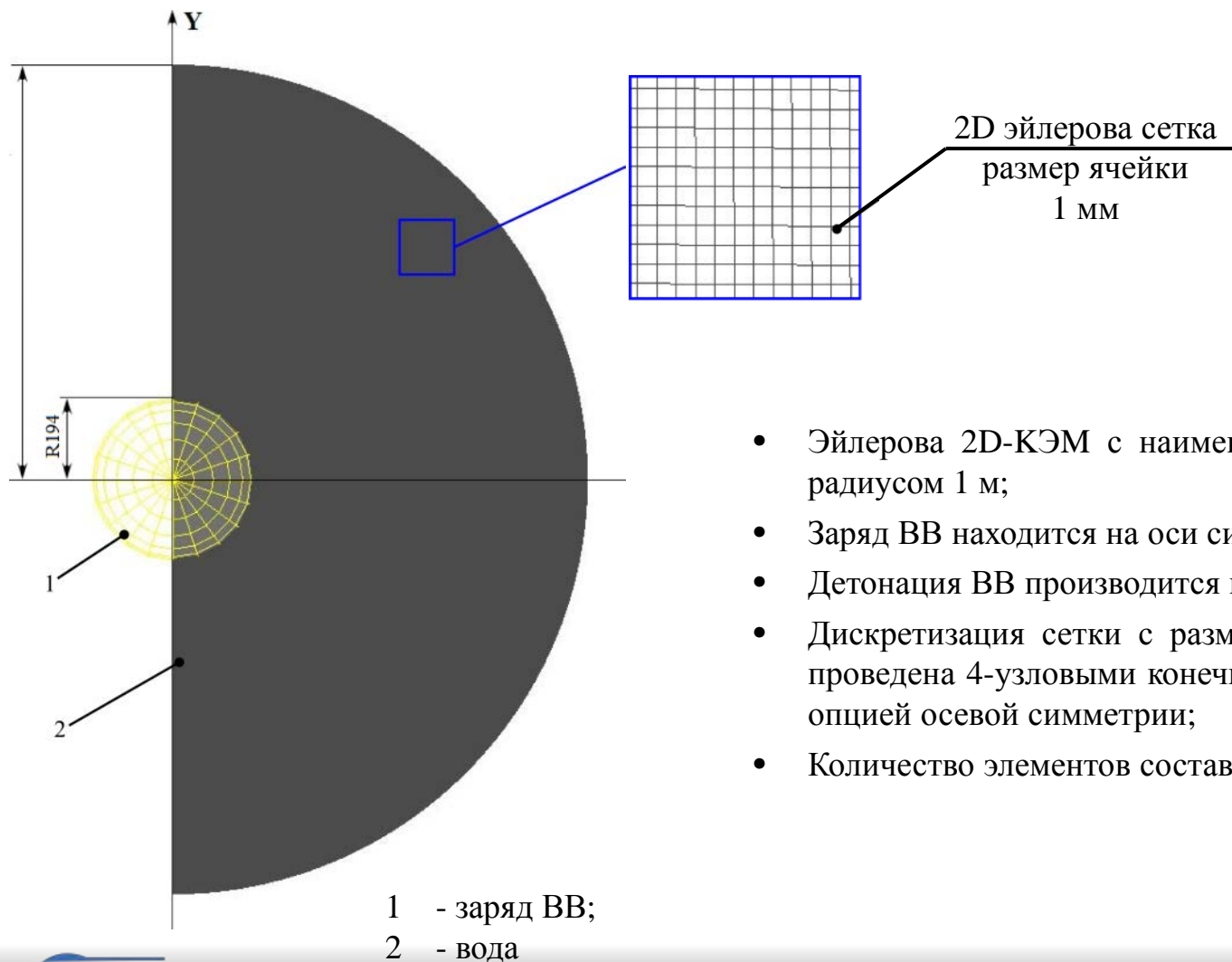
Продукты взрыва моделируются уравнением состояния Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) со следующими параметрами:

- $A = 3.712$ Мбар;
- $B = 0.03231$ Мбар;
- $R_1 = 4.15$;
- $R_2 = 0.95$;
- $\omega = 0.3$;
- начальная удельная энергия $e_0 = 0.07$ Мбар.

Поведение **воды** описывается моделью материала со следующими свойствами:

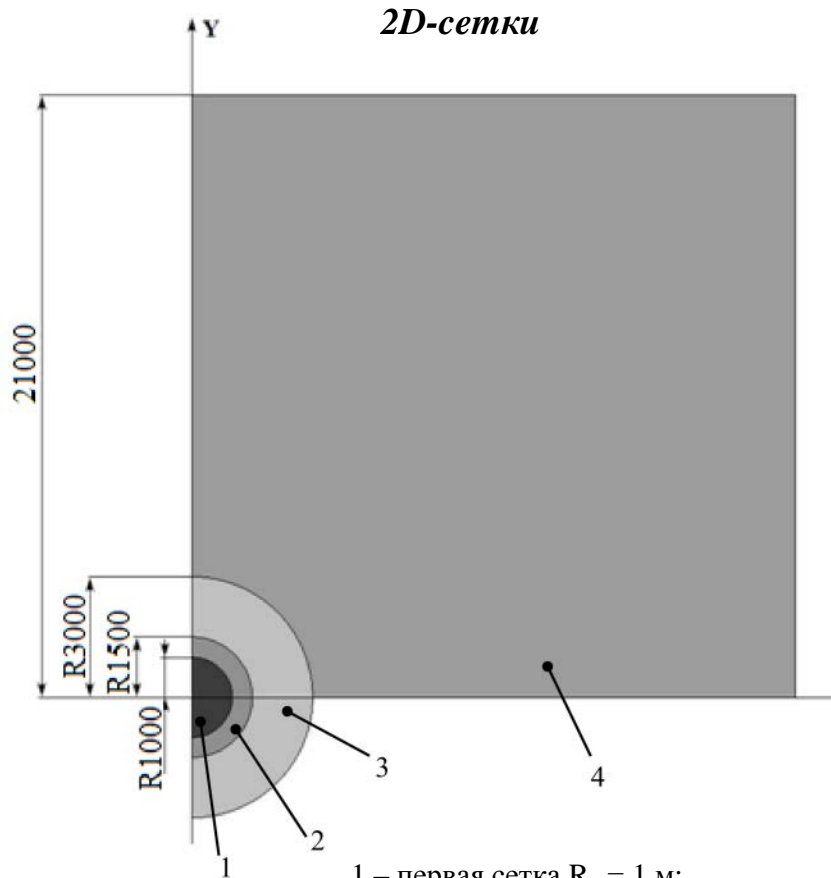
- плотность $\rho = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$;
- скорость распространения звука в воде $C = 0.165 \frac{\text{см}}{\text{мкс}}$;
- параметры воды $s_1 = 1.92$; $s_2 = s_3 = 0$;
- коэффициент Грюнайзена $\gamma = 0.1$

Осесимметричная 2D-КЭМ



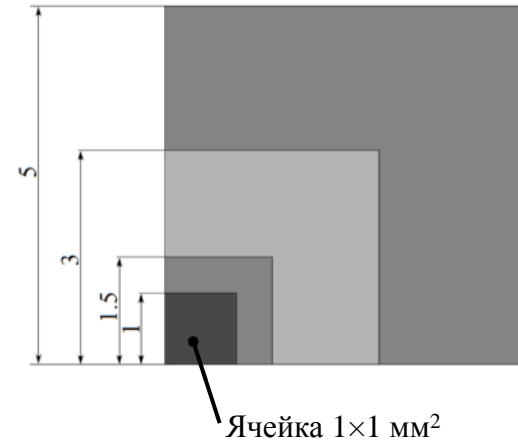
- Эйлерова 2D-КЭМ с наименьшим габаритным радиусом 1 м;
- Заряд ВВ находится на оси симметрии;
- Детонация ВВ производится из центра заряда;
- Дискретизация сетки с размером ячейки 1 мм проведена 4-узловыми конечными элементами с опцией осевой симметрии;
- Количество элементов составляет $1.5 \cdot 10^6$.

Моделирование подводной ударной волны. Мэппинг

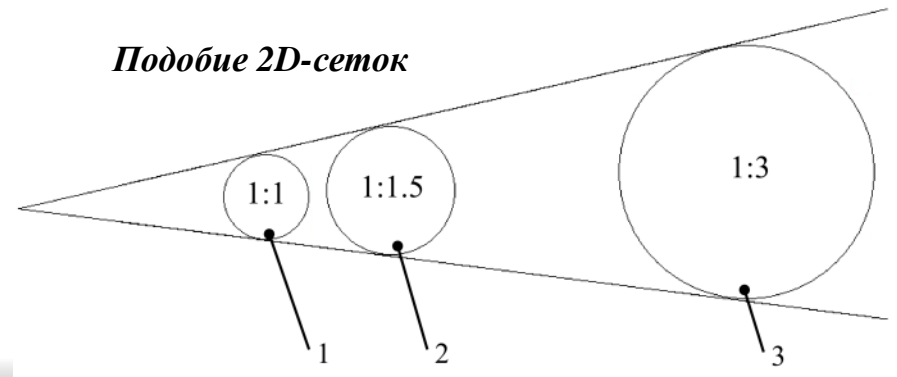


- 1 – первая сетка $R_1 = 1$ м;
- 2 – вторая сетка $R_2 = 1.5$ м;
- 3 – третья сетка $R_3 = 3$ м;
- 4 – четвертая сетка $a = 21$ м

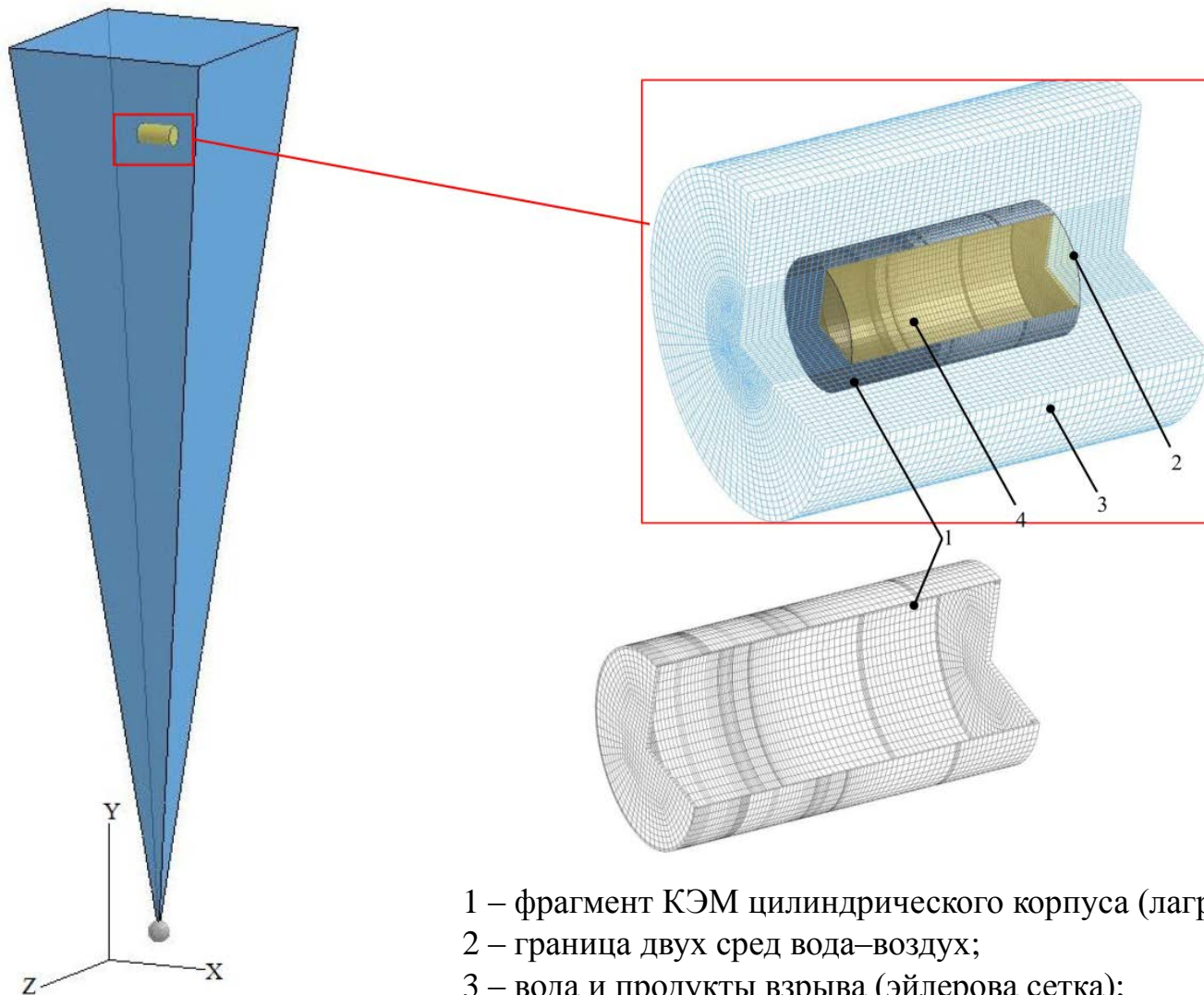
Увеличение ячеек 2D-сеток от 1 до 5 мм



Подобие 2D-сеток

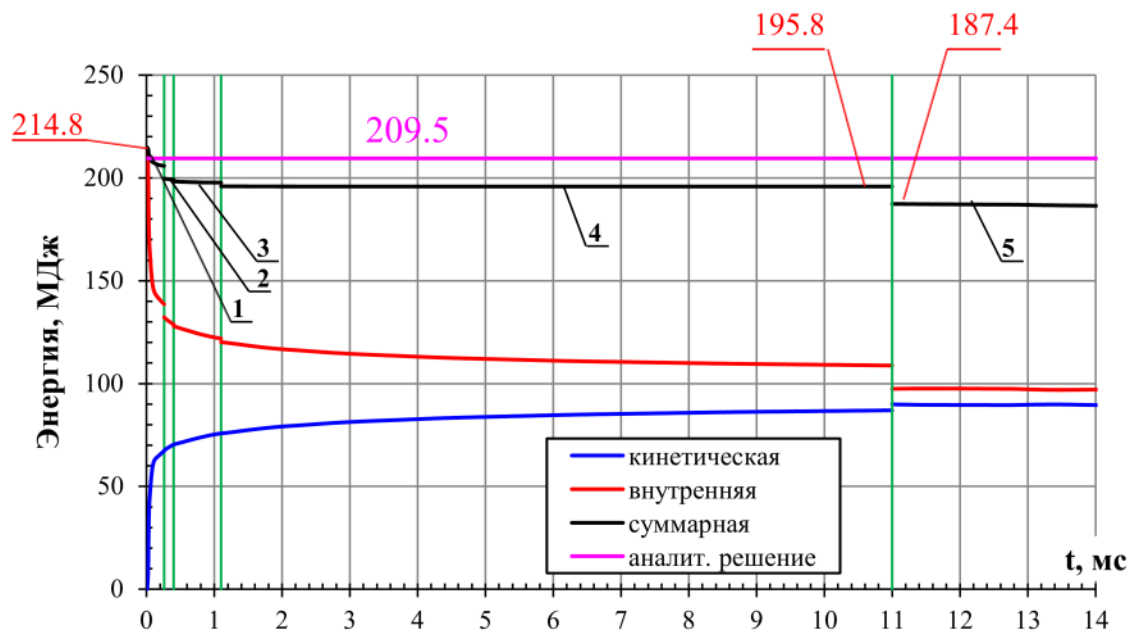


Моделирование прямого воздействия ПУВ на цилиндрический корпус. 3D-КЭМ

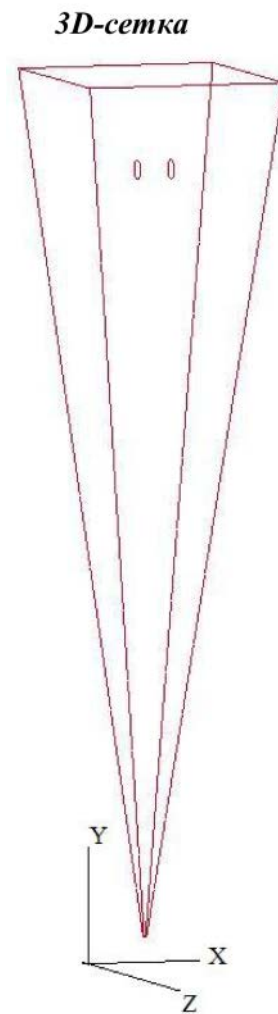
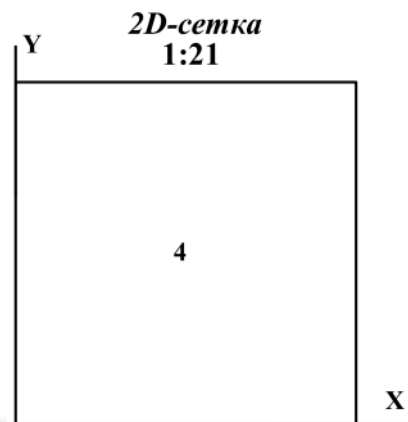
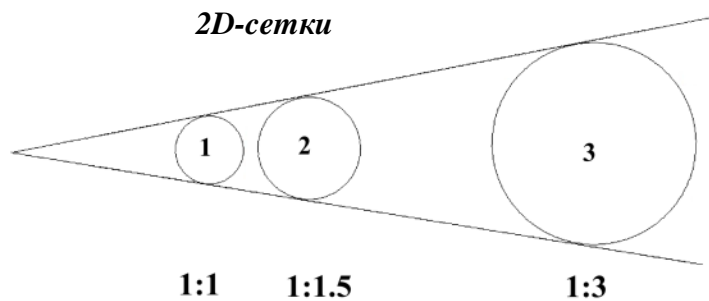


- 1 – фрагмент КЭМ цилиндрического корпуса (лагранжевая сетка);
- 2 – граница двух сред вода–воздух;
- 3 – вода и продукты взрыва (эйлерова сетка);
- 4 – воздух (эйлерова сетка)

Результаты расчетов. Изменение энергии при подрыве заряда 50 кг ТЭ в неограниченном объеме



1–4 – решение, полученное на 2D-сетках;
5 – решение, полученное на 3D-сетке



Верификация параметров ПУВ по экспериментальным и аналитическим данным

Таблица 1 – Расчетные параметры ПУВ

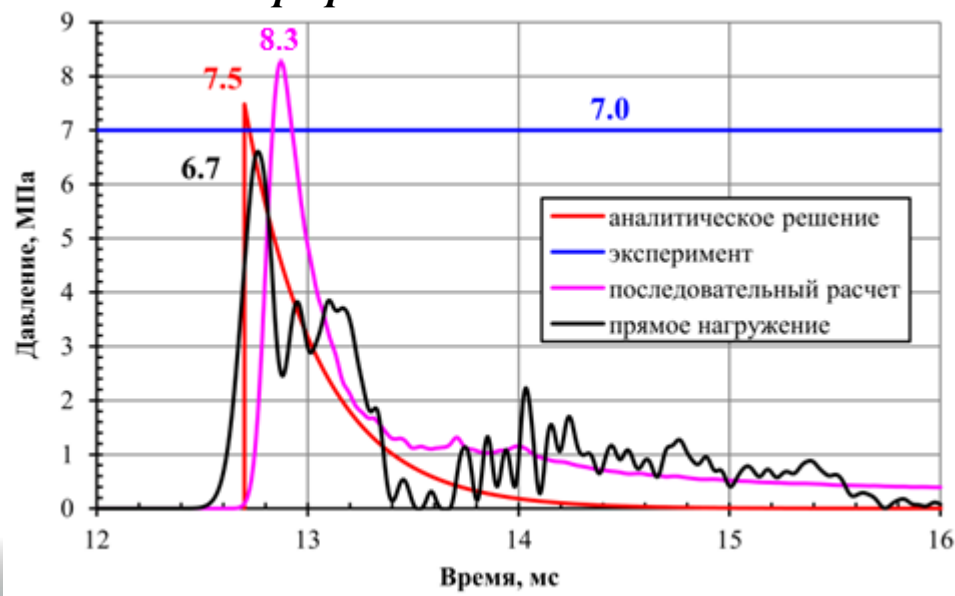
Распространение ПУВ			Амплитуда давления, МПа	
Время после детонации, мс	Радиус, м	Скорость, м/с	Аналитическое	Расчетное
0.26	0.79	30380	284	477
0.4	1.06	1930	206	309
1.1	2.33	1810	87.3	108.6
11.0	18.9	1670	8.9	7.9
12.6*	21.5	1625	7.5	6.7

* Момент времени соответствует началу нагружения конструкции ПУВ.

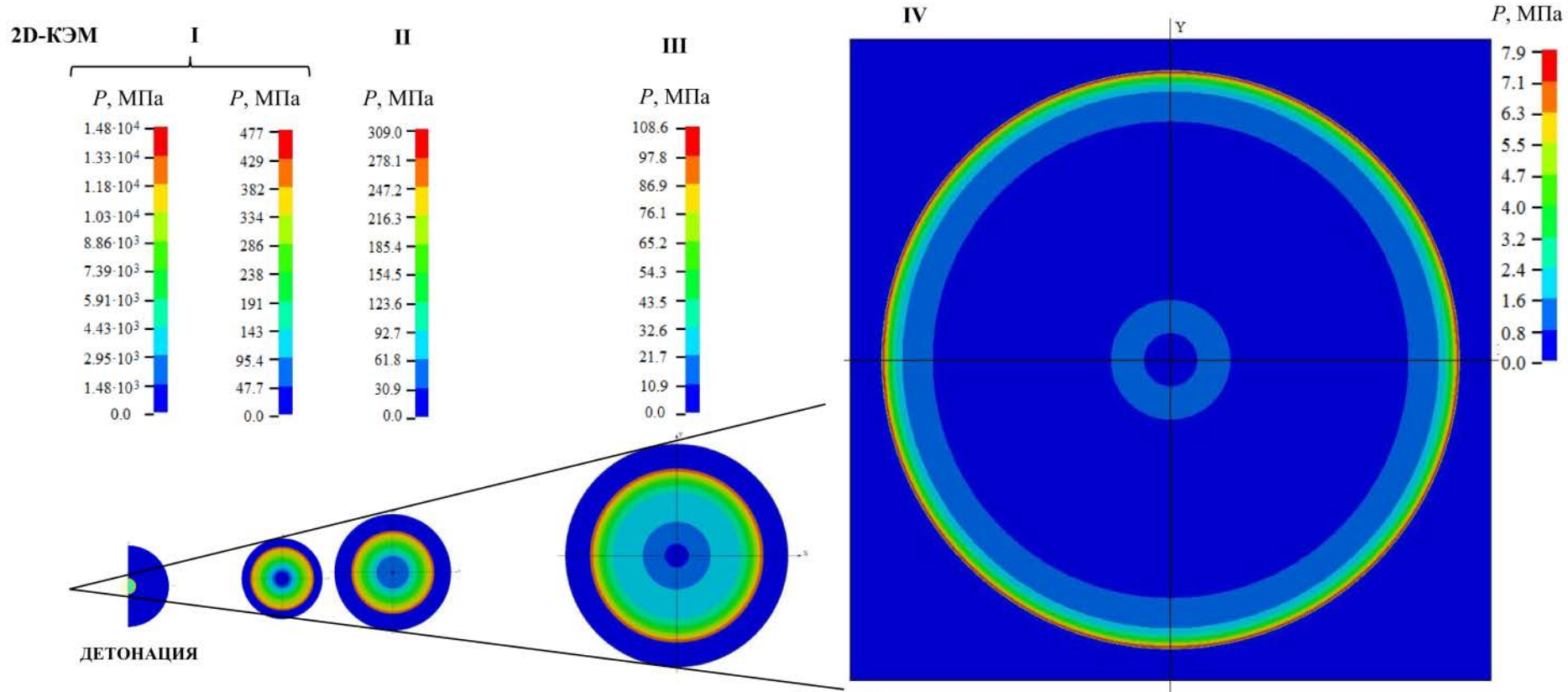
Полученное расчетное давление в ближайшей к заряду точке $P_{\text{расч}} = 6.7$ МПа на 10.7% ниже аналитического значения $P_{\text{теор}} = 7.5$ МПа и на 4% – экспериментального $P_{\text{эксп}} = 7$ МПа.

Отметим, что при последовательном подходе воздействия ПУВ на конструкцию было получено давление $P = 8.3$ МПа.

Профили давления ПУВ

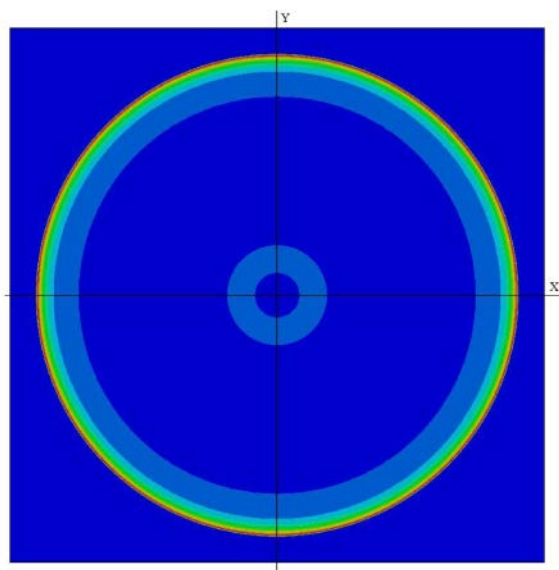


Мэппинг ПУВ с 2D- на 2D-сетку. Распределение давления



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

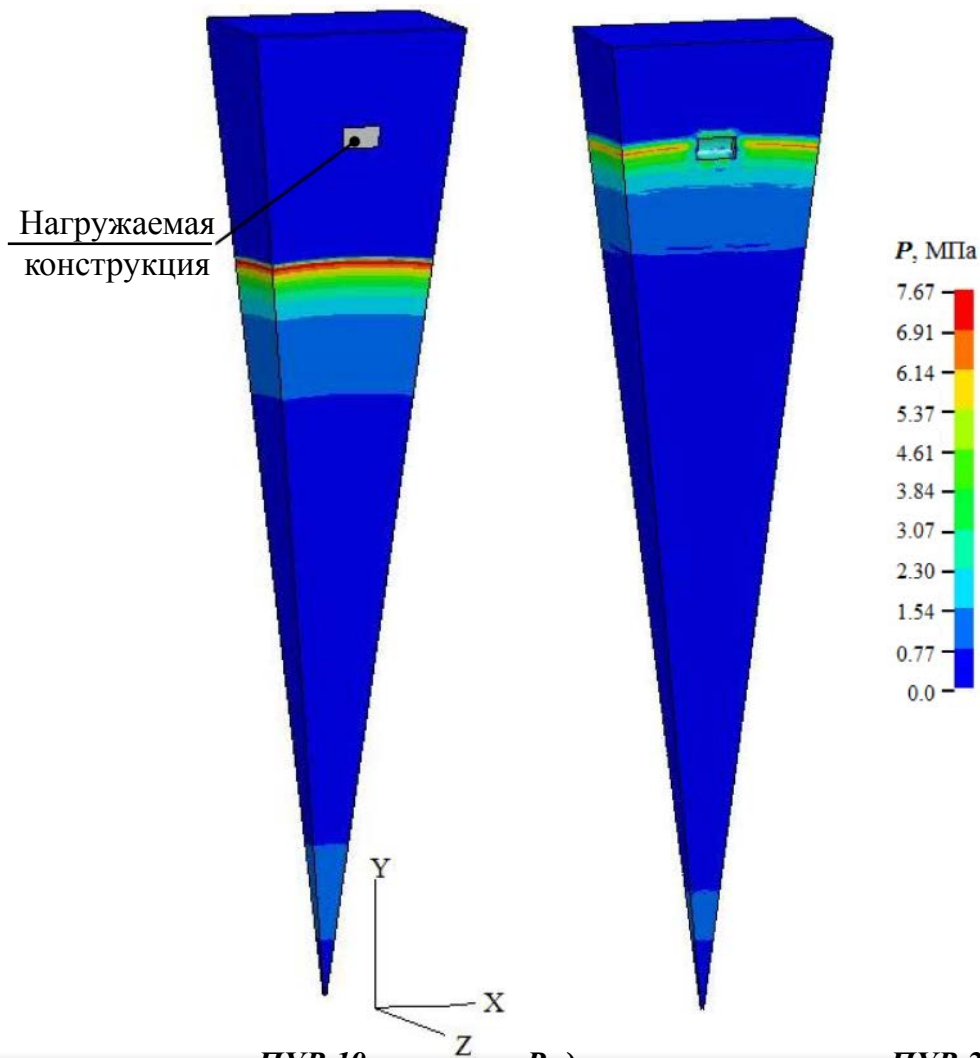
ПУВ на 2D-сетке



Радиус распространения ПУВ 19 м



ПУВ на 3D-сетке

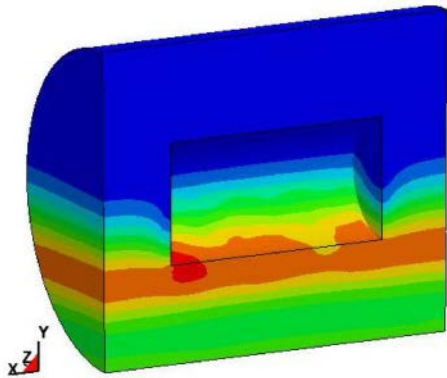


Радиус распространения ПУВ 19 м

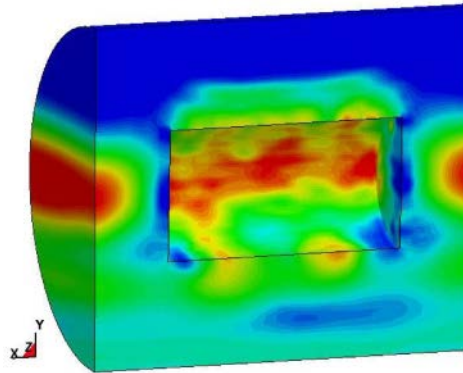
Радиус распространения ПУВ 22 м

Прямое воздействие ПУВ на цилиндрический корпус

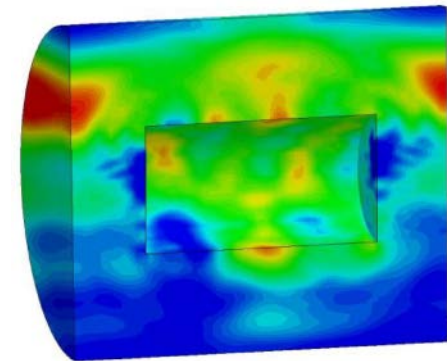
Распределение давления в подводной ударной волне



$P_{max} = 6.7$ МПа

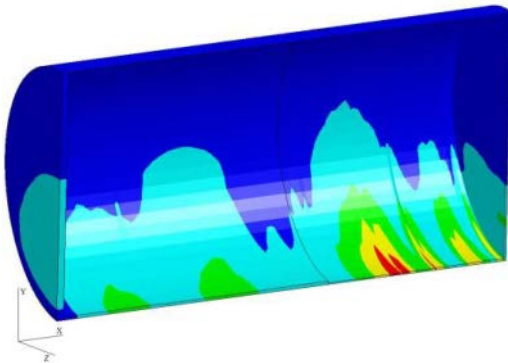


$P_{max} = 6.3$ МПа

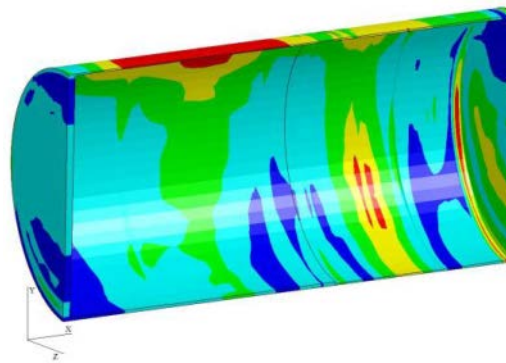


$P_{max} = 5.6$ МПа

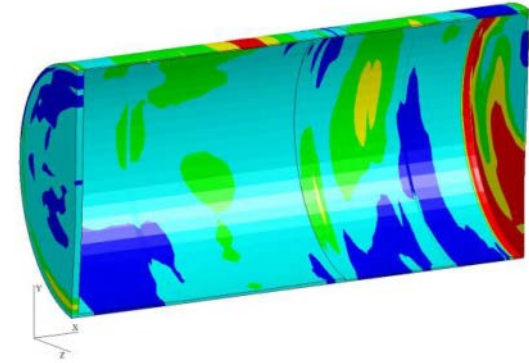
Распределение эквивалентных напряжений на корпусе конструкции



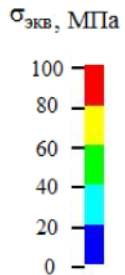
$t = 12.8$ мс



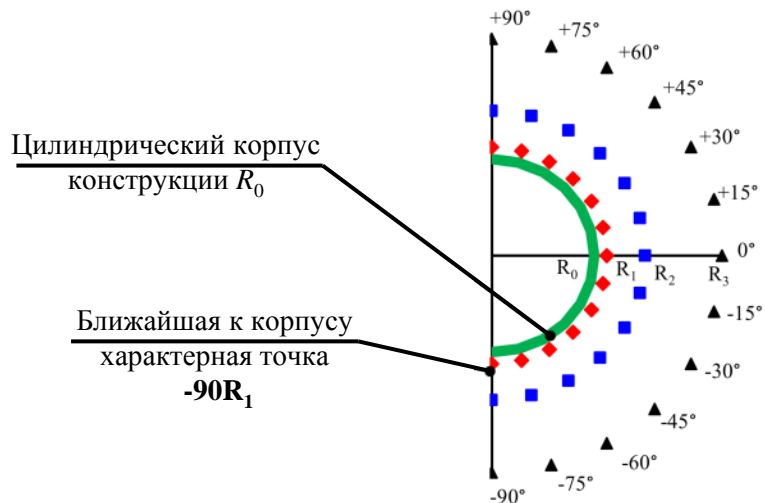
$t = 13.0$ мс



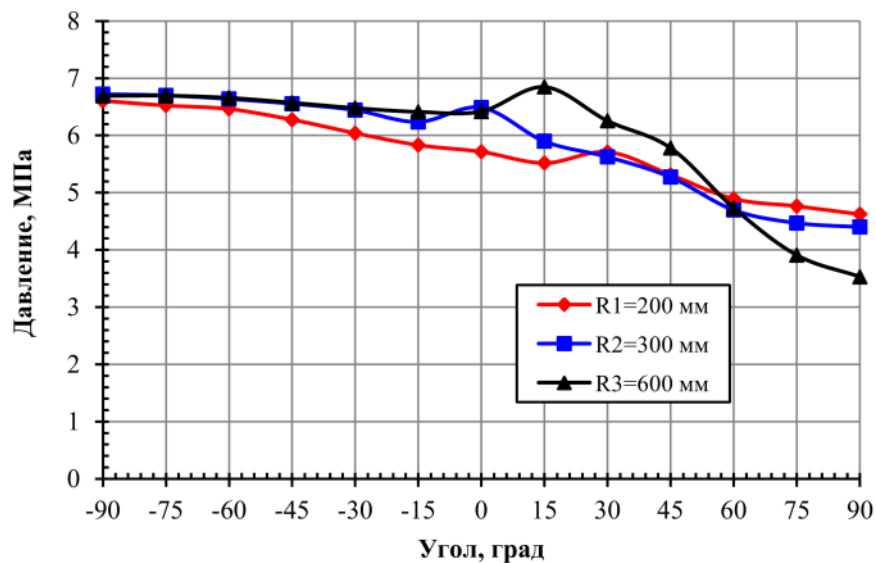
$t = 13.2$ мс



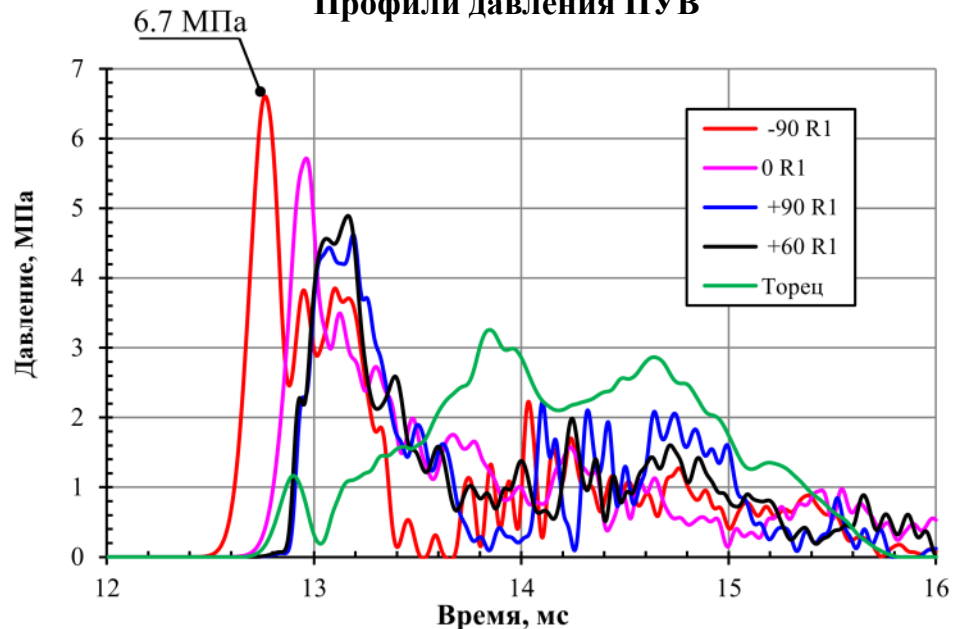
Прямое воздействие ПУВ на цилиндрический корпус. Профили давления



Амплитуда давлений в характерных точках ПУВ



Профили давления ПУВ



Полученное расчетное давление в ближайшей к корпусу точке $P_{расч} = 6.7$ МПа.

Отметим, что при последовательном подходе нагружения конструкции ПУВ было получено давление $P = 8.3$ МПа.

Заключение

Проведены численные расчеты прямого воздействия подводной ударной волны 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 расчетных сеток. Такой подход 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.

Список литературы

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

Спасибо за внимание!