

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

Д.Т. Юсупов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е.И. Забахина», Снежинск, Россия

Посвящается памяти Юрия Митрофановича Корепанова.

Основополагающей для проведённых исследований работой теоретического и экспериментального изучения вопросов устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек под действием ударной волны подводного взрыва явилась работа М.А. Лаврентьева [1].

Обычно в исследованиях рассматривается потеря устойчивости оболочек или в пределах упругости, или при относительно больших размерах оболочки по отношению к динамической длине взрыва. Данные же по особенностям деформации (перекрытия) цилиндрических оболочек при большом отношении длины волны к радиусу оболочки практически отсутствуют.

При проведении исследований в рамках данной работы в большинстве опытов использовались трубки из никеля с присадкой кобальта (сплав НМГ-В). Такой выбор обусловлен, прежде всего, большим ассортиментом выпускаемых трубок малых размеров по диаметру и толщине стенки, достаточно высокой точностью изготовления. Диаметр исследованных трубок изменялся в пределах от 0,3 до 3,0 мм, а относительная толщина  $h/r$  ( $h$  – толщина,  $r$  – радиус трубки) – от 6 до 40%.

Предел прочности материала трубок (на разрыв при статическом нагружении), по данным завода-изготовителя, составляет  $\sigma_{np} = 0,6 - 0,65$  ГПа, что соответствует прочности некоторых обыкновенных марок стали. Указанное значение  $\sigma_{np}$  дополнительно было проконтролировано в лабораторных испытаниях на разрыв некоторых трубок. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Значения  $\sigma_{np}$  получены как отношения усилия разрыва  $F$  к площади поперечного сечения  $S$  и приведены как средние 2-3 испытаний. Погрешность определения их зависит в основном от отклонений геометрических размеров от номинальных значений и составляет  $\leq 10\%$ .

Таблица 1 Результаты статических испытаний трубок на разрыв

Материал трубок	Размеры трубок		$\bar{\sigma}_{np} = F/S$ , ГПа	$\sigma_m$ , ГПа
	$\varnothing \times h$ , мм	$h/r$ , %		
НМГ-В	1,65×0,05	6,1	0,60	–
НМГ-В	1,4×0,05	7,2	0,63	–
НМГ-В	5,4×0,2	7,4	0,76	0,71
НМГ-В	1,3×0,05	7,7	0,62	–
НМГ-В	3,6×0,15	8,4	0,53	0,51
НМГ-В	1,0×0,05	10,0	0,70	–
НМГ-В	0,8×0,05	12,5	0,60	–
НМГ-В	1,0×0,1	20,0	0,61	–
НМГ-В	1,7×0,2	23,8	0,72	–
ст. ЭИ844БЭШ	2,0×0,1	10,0	0,92	0,47
ст. ЭИ844БЭШ	1,2×0,1	16,7	0,94	–
ст. 0X18Н10Т	1,5×0,1	13,3	0,82	0,43
ст. 0X18Н10Т	1,0×0,1	20,0	0,90	–

В условиях гидростатического нагружения была исследована зависимость критических давлений  $P_{см.}$ , при которых происходит полное схлопывание трубок, от их относительной толщины  $h/r$ . Запаянные с обоих концов трубки длиной  $L \cong 100$  мм (то есть  $L \gg d_{mp.}$ ) помещались в гидрокамеру высокого давления. Для регистрации  $P_{см.}$  использовался звуковой эффект-хлопок, соответствующий моменту потери устойчивости трубки. С этой целью на корпус гидрокамеры устанавливался микрофон, подключенный к усилителю. Плавное увеличение давления в гидрокамере позволило с хорошей точностью измерить критическое давление соответствующее моменту схлопывания.

Полученные результаты приведены в таблице 2 и показаны на рисунке 1 в виде зависимости  $P_{см.} = f(h/r)$ . В них же для сравнения приведены результаты динамических исследований, которые подробнее будут рассмотрены далее.

Таблица 2 Результаты статических испытаний трубок

№ п./п.	Материал трубок	Параметры трубок		$P_{см.}$ , ГПа	$R_{кр.} \pm 2\sigma$ , мм	$\bar{R} = R_{кр.}/R_{зар.}$	$P_{дин.}$ , ГПа
		$\varnothing \times h$ , мм	$h/r \pm \Delta h/r$ , %				
1	Сплав НМГ-В	1,65×0,05	6,1±0,7	0,015	1112±48	41,8±1,8	0,0243
2		3,0×0,1	6,7±0,7	0,016	726±36	26,9±1,3	0,0357
3		2,9×0,1	6,9±0,7	0,015	831±50	30,8±1,8	0,034
4		1,4×0,05	7,2±0,8	0,014÷0,019	780±23	28,9±0,8	0,0363
5		5,4×0,2	7,4±0,8	0,021÷0,023	437±36	16,2±1,0	0,0715
6		2,6×0,1	7,7±0,9	0,02÷0,021	633±27	23,4±1,0	0,0469
7		1,3×0,05	7,7±0,9	0,02÷0,023	761±40	28,2±1,5	0,0379
8		3,6×0,15	8,4±0,9	0,02÷0,021	588±25	21,7±0,9	0,0506
9		1,15×0,05	8,7±1,0	0,0312	600±37	22,4±1,4	0,0495
10		1,0×0,05	10±1,1	0,04÷0,045	475±36	17,6±1,3	0,0647
11		2,0×0,1	10±1,1	0,051	370±26	13,7±0,8	0,0848
12		1,7×0,1	11,8±1,3	0,059	362±15	13,4±0,5	0,0899
13		0,8×0,05	12,5±1,6	0,058÷0,059	400±52	14,8±1,9	0,0779
14		2,4×0,15	12,5±1,6	0,056	354±30	13,1±1,1	0,0923
15		1,6×0,1	12,5±1,6	0,056÷0,059	306±15	11,3±0,5	0,1105
16		0,65×0,05	15,4±2	0,09	283±30	10,5±1,1	0,122
17		1,3×0,1	15,4±2	0,094÷0,095	241±13	8,9±0,5	0,1503
18		1,0×0,1	20,0±2,5	0,135	202±27	7,5±0,9	0,1876
19		1,5×0,15	20,0±2,5	0,137	167±22	6,2±0,8	0,2445
20		0,85×0,1	23,8±3,2	0,137	167±17	6,2±0,6	0,2443
21		1,7×0,2	23,8±3,2	0,136÷0,15	159±9	5,9±0,3	0,2718
22	ст.ЭИ844БЭШ	2,0×0,1	10,0±1,5	0,04	389±31	14,4±1,2	0,0820
23	ст.ОХ18Н10Т	1,5×0,1	13,3±2	0,067	325±26	12±1	0,103
24	ст.ЭИ844БЭШ	1,2×0,1	16,7±2,7	–	163±10	6,4±0,4	0,255
25	ст.ОХ18Н10Т	1,0×0,1	20,0±3	–	194±23	7,2±0,8	0,195

Все трубки, для которых  $13 < h/r < 24$  %, в сдеформированном состоянии имели вид пластин и теряли устойчивость по второй гармонике. В качестве частного результата на рисунке 2 показан характер потери устойчивости трубки  $\varnothing 1,0 \times 0,05$  ( $h/r = 10$  %).

Наблюдалось чередование пережатых участков примерно одинаковой длины, которые находятся во взаимно перпендикулярных плоскостях. Отдельное изучение и анализ подобных форм потери устойчивости (которые имеют место и при динамическом нагружении) имеют определенный интерес.

Существенным результатом статических испытаний является тот факт, что при  $h/r \geq 24\%$  значения  $P_{ст.}$  не соответствуют полученной зависимости, точнее говоря, такие трубки на имеющейся установке пережать не удалось.

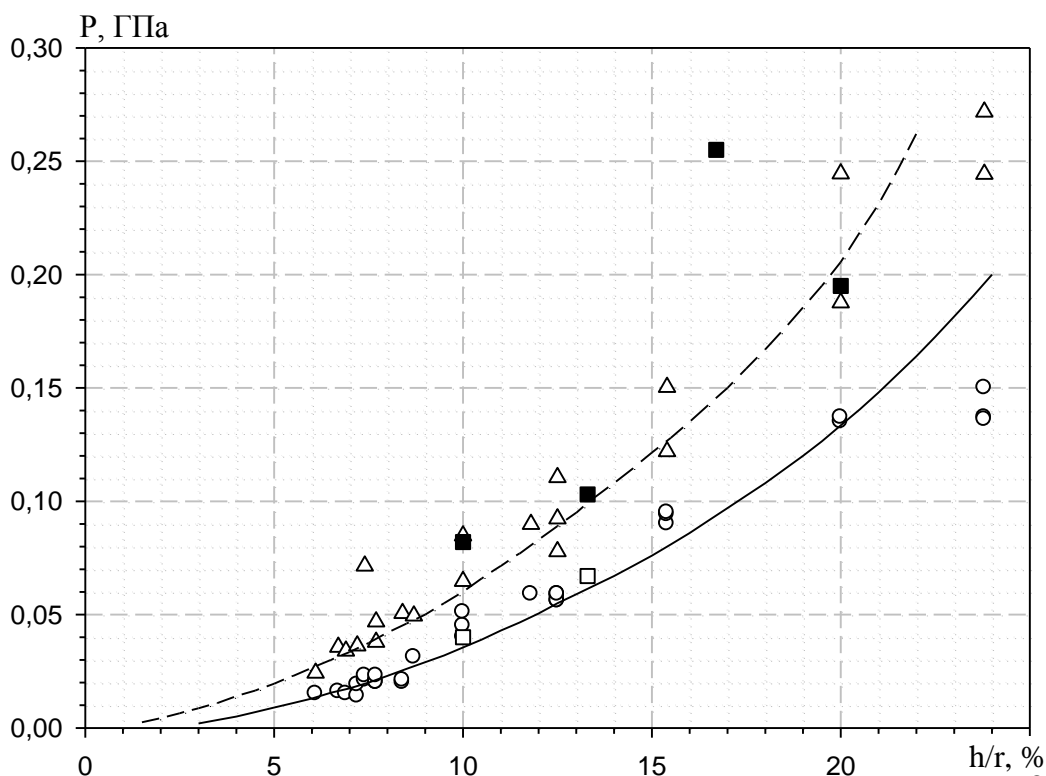


Рисунок 1 – Данные по статическому и динамическому нагружениям стальных трубок и трубок из сплава НМГ – В

- – экспериментальные данные по статическому нагружению трубок из сплава НМГ–В;
- △ – экспериментальные данные по динамическому нагружению трубок из сплава НМГ–В;
- – экспериментальные данные по статическому нагружению трубок из стали;
- – экспериментальные данные по динамическому нагружению трубок из стали;
- статическое нагружение  $P_{ст.} = f(h/r)$ ;
- - - динамическое нагружение  $P_{дин.} = f(h/r)$

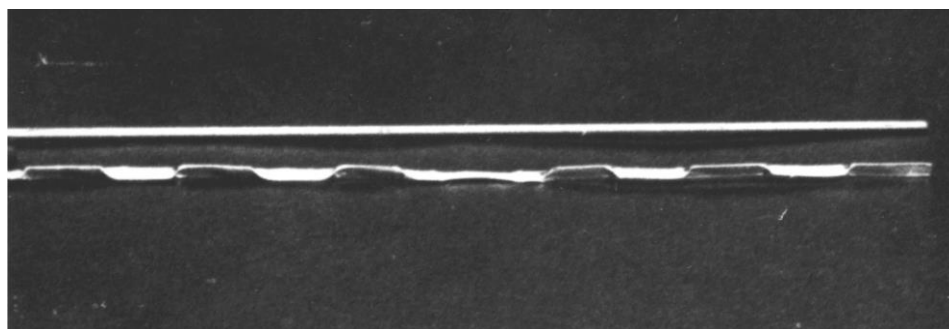


Рисунок 2 – Потеря устойчивости трубки  $\varnothing 1,0 \times 0,05$  ( $h/r = 10\%$ )

Таким образом, существует критическое значение  $h/r$ , при котором наступает качественное изменение характера деформации трубки, выражающееся в том, что она не теряет устойчивости при любом давлении, а испытывает всестороннее обжатие, определяемое величиной этого давления.

Как следует из приведенных экспериментальных результатов, значения  $P_{ст.}$  для одного материала трубок определяются только относительной их толщиной и не зависят от диаметра.

Опыты по ударному нагружению трубок проводились в естественном водоеме, на берегу которого была смонтирована установка, представляющая собой поворотную стрелу с противовесом для опускания экспериментальной сборки с зарядом в воду на глубину ~ 1,5 м (рисунок 3). Основной частью установки являлся измерительный узел, схема которого в окончательно снаряженном виде так же показана на рисунке 2.

Один из вариантов каркаса изготовлен в виде шестиугольной призмы, где мерительный узел предназначен для проведения экспериментов с «боковым» подходом ударной волны, то есть когда направление ее фронта перпендикулярно к трубке (рисунок 3 внизу слева). В центре каркаса устанавливался заряд ВВ с помощью соосных, вертикально расположенных стальных спиц и держателей. Радиальные планки каркаса использовались для крепления исследуемых трубок на различных расстояниях от заряда. Каждая трубка крепилась к планкам с помощью проволоки.

В качестве источника расходящейся ударной волны в большинстве опытов использован шаровой заряд из смеси тротила с гексогеном весом  $\approx 130$  г,  $\varnothing 54$  мм. Подрыв заряда производится с помощью капсуля-электродетонатора из центра.

Экспериментальное определение и расчет параметров ударной волны при подводном взрыве химических ВВ проводился в ряде работ [2, 3, 4, 5]. Принято считать, что дальняя зона взрыва ( $R > 5r_{зар.}$ ) хорошо описывается известной формулой Коула [6].

В результате многочисленных опытов, проведенных с зарядами ТЭНа разной плотности, предложена формула для зависимости максимальных давлений на фронте ударной волны от расстояния до центра взрыва [2, 3]

$$P = \frac{A}{(R^o)^3} + \frac{B}{(R^o)^{1,13}}, \text{ при } 0,053 \leq R^o \leq 15,$$

где  $P$  – давление в атм.;  $R^o = \frac{R}{\sqrt[3]{C}}$  ( $м/кг^{1/3}$ );  $C$  – вес заряда.

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  для ТЭНа соответственно равны 16 и 604, а для других ВВ определяются их энергоемкостью и могут быть вычислены с помощью приближенной зависимости

$$A_i = \gamma_i A, \quad B_i = \gamma_i' B,$$

$$\text{где } \gamma_i = \frac{Q_i}{Q_T}; \quad \gamma_i' = \left( \frac{Q_i}{Q_T} \right)^{\frac{1,13}{3}} = \left( \frac{Q_i}{Q_T} \right)^{0,376}$$

$Q_i$  – удельная энергия рассматриваемого ВВ;

$Q_T$  – удельная энергия ТЭНа.

Приняв для используемой смеси тротила и гексогена  $Q = 1260$  ккал/г, получим  $\gamma_i = 0,90$ ;  $\gamma_i' = 0,96$ . Таким образом,

$$A_i = \gamma_i A, = 16 \times 0,9 = 14,4$$

$$B_i = \gamma_i' B, = 604 \times 0,96 = 580,4,$$

и формула для определения максимальных давлений на фронте ударной волны в воде принимает следующий вид

$$P = \frac{14,4}{(R^o)^3} + \frac{580,4}{(R^o)^{1,13}}$$

Расчетный график, построенный по этой формуле, показан на рисунке 4, где приведенный радиус есть отношение радиуса распространения ударной волны к радиусу заряда.

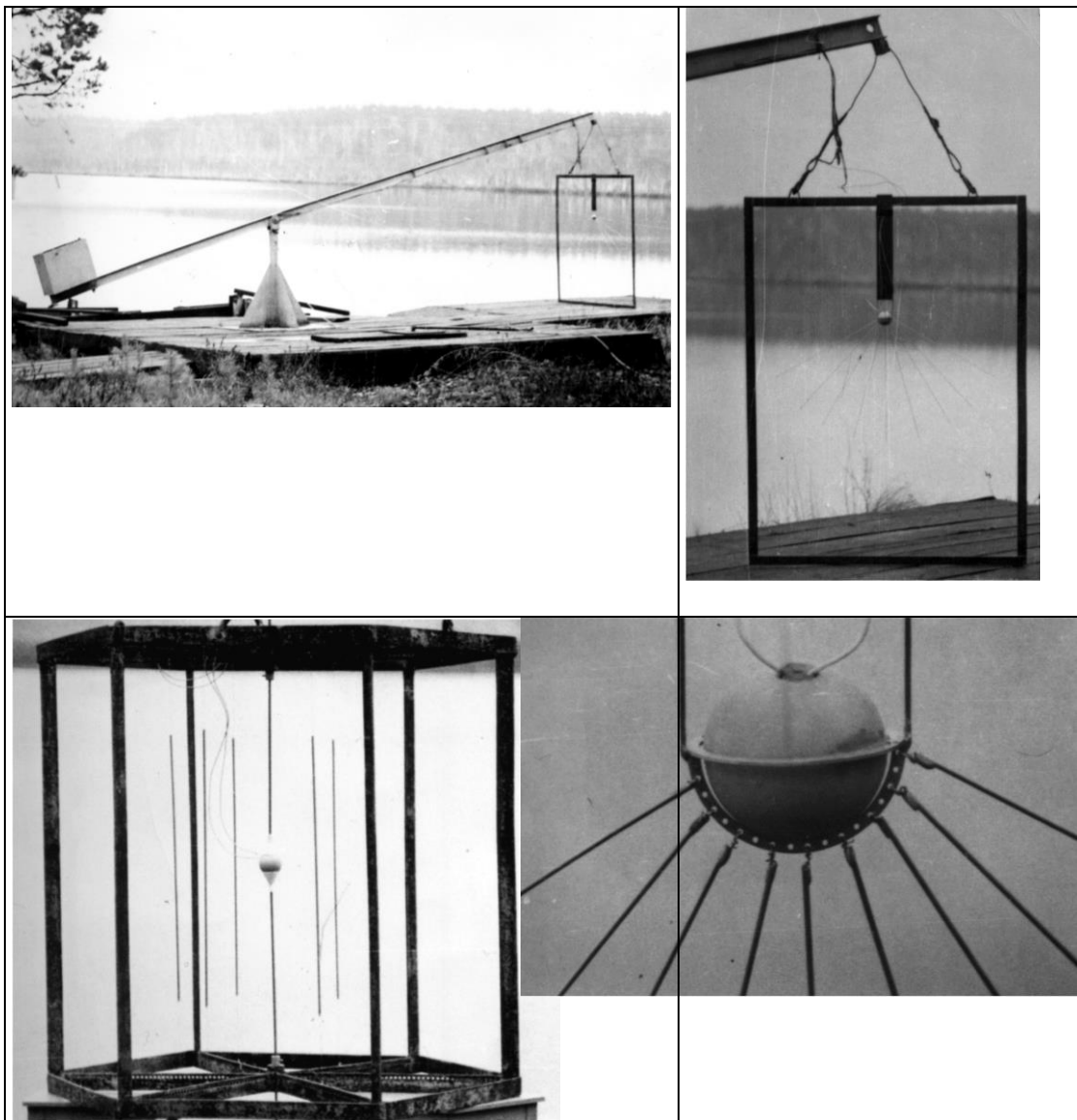


Рисунок 3 – Схема постановки подводных опытов

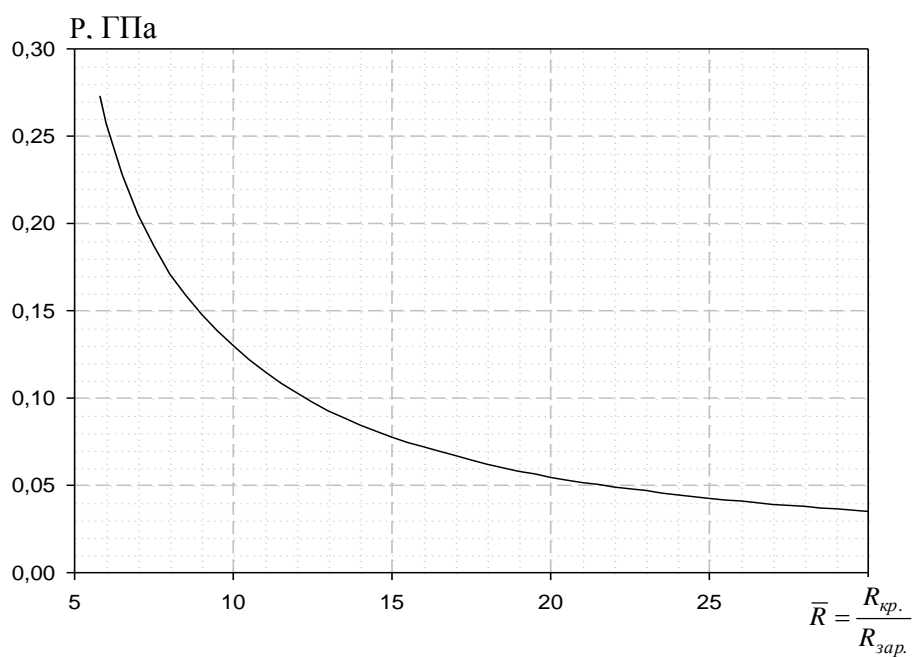


Рисунок 4 – Расчетный график зависимости давления от приведенного радиуса

Очевидно, что радиально расположенные трубки (по радиусу заряда) оказались нагруженными переменным давлением ударной волны, амплитуда которого уменьшалась от центра к периферии.

Длина всех трубок была выбрана такой, что дальняя от заряда часть каждой из них остается неповрежденной, то есть не претерпевала заметных остаточных деформаций.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что в качественном отношении характер потери устойчивости всех трубок как никелевых, так и стальных с относительной толщиной от 6 до 22 % одинаков и сводился к следующему. В ближней зоне происходило всестороннее гидродинамическое обжатие оболочки, обусловленное давлением, во много раз превышающим прочность ее материала. Обжатые трубки в этой зоне имели вид стержня. Далее происходила потеря устойчивости по гармоникам, число которых по окружности (по радиальному углу  $\varphi$ ) уменьшалось по мере затухания расходящейся ударной волны, и, наконец, значительная часть трубки оказывалась сжатой в пластину, что соответствовало второй гармонике. Снижение частоты гармоник по  $\varphi$  при уменьшении скорости схождения оболочки сопровождалось увеличением амплитуды гармонических возмущений.

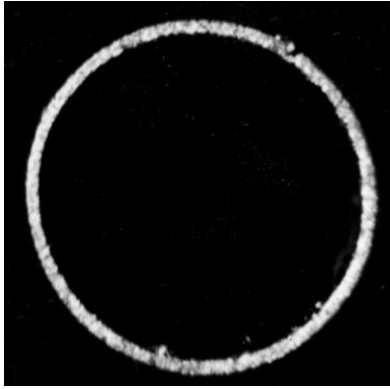
На рисунке 5, показан пример фотографий шлифов сечений ударно-нагруженной трубки на различных расстояниях от заряда, которые наглядно иллюстрируют указанные особенности деформации. Важным результатом является наличие резкого перехода от зоны полной потери устойчивости трубок к зоне, где заметные деформации отсутствуют (рисунок 6).

Расстояние от центра заряда до указанной точки перехода между второй гармоникой и целой трубкой называют критическим расстоянием  $R_{кр.}$ , а соответствующие им давления в ударной волне – критическими давлениями  $P_{кр.}$

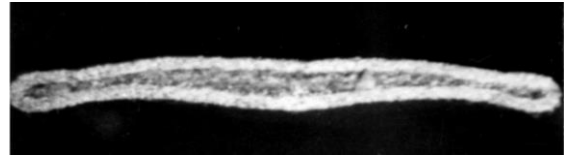
В случае относительно толстых трубок ( $h/r > 24\%$ ) характер деформации их существенно изменился. В ближней зоне также происходило полное гидродинамическое обжатие. Затем следовал плавный переход к зоне, где заметные деформации отсутствуют. Переходная часть представляла собой конус, во всех сечениях которого профили как внутренней, так и наружной поверхности сохраняют вид окружностей (рисунки 7, 8). Потеря устойчивости по гармоникам в таких трубках отсутствует на всех расстояниях от заряда, то есть при любом из реализованных давлений.

Учитывая, что обычно относительная толщина труб или оболочек, как правило, не превышала от 10 до 15 %, более подробного исследования толстостенных трубок в настоящей работе не проводилось. Для тонких же трубок изучена зависимость  $\frac{R_{кр.}}{R_{зар.}} = f(h/r)$ , построенная на рисунке 9 с использованием данных таблицы 2.

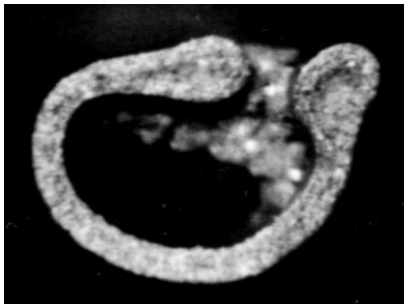
Разброс точек на графиках определяется в основном начальными отклонениями от цилиндрической геометрии трубок. Значения  $R_{кр.}$  в таблице для каждого номинала трубок получены усреднением данных по 10-15 измерениям. Погрешность отдельного измерения  $R_{кр.}$  для данного номинала трубки, определенная с надежностью  $\alpha = 0,95$ , колеблется для разных номиналов типоразмеров от 2 до 6 %.



$R = 932 \text{ мм}, P \leq 0,02899 \text{ ГПа}$



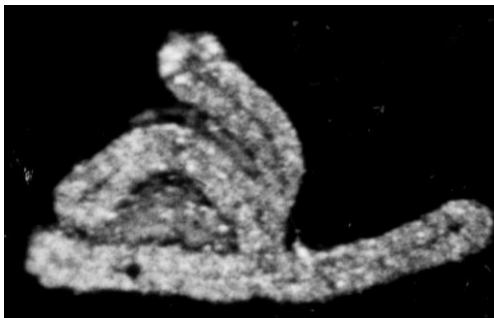
$R = 928 \text{ мм}, P = 0,0291 \text{ ГПа}$



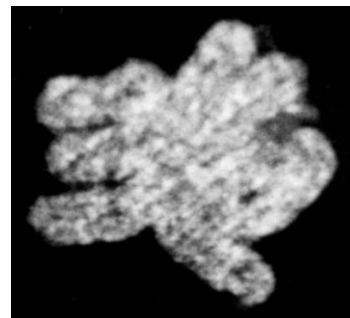
$R = 630 \text{ мм}, P = 0,0455 \text{ ГПа}$



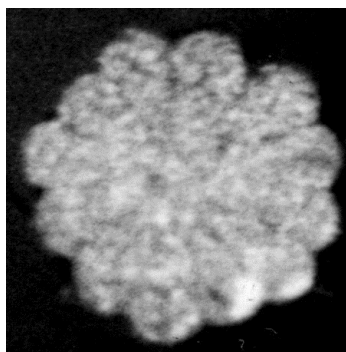
$R = 530 \text{ мм}, P = 0,0557 \text{ ГПа}$



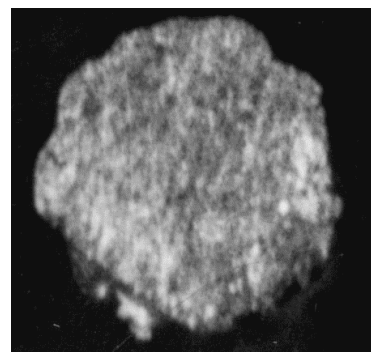
$R = 440 \text{ мм}, P = 0,0693 \text{ ГПа}$



$R = 322 \text{ мм}, P = 0,1011 \text{ ГПа}$



$R = 175 \text{ мм}, P = 0,2251 \text{ ГПа}$



$R = 110 \text{ мм}, P \geq 0,4618 \text{ ГПа}$

Рисунок 5 – Подводный опыт. Трубка никелевая.  $\varnothing 1,5 \times 0,05$ ,  $h/r = 6,7 \%$

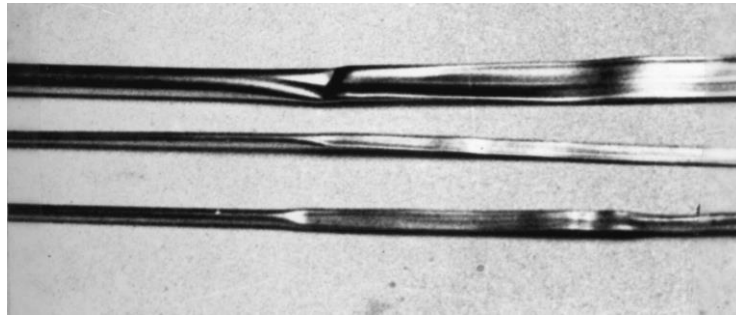


Рисунок 6 – Переход от второй гармоники к зоне, где видимые деформации отсутствуют

Сопоставление расчетного графика давлений в ударной волне с полученной экспериментальной зависимостью позволило построить кривую  $P_{кр.} = f(h/r)$ , представленную на рисунке 1 в сравнении с результатами статических испытаний.

Анализ полученных результатов показал, что в исследованном диапазоне геометрических размеров трубок при фиксированном радиусе заряда критические расстояния и соответствующие давления не зависят от диаметра трубок и однозначно определяются их относительной толщиной.

При данной энергии заряда, одинаковой относительной толщине и одинаковых упругих и прочностных характеристиках материала трубок, импульс давления, необходимый для перекрытия их, должен возрастать с увеличением диаметра, то есть критические расстояния соответственно должны уменьшаться.

Подтверждением этого является значение  $R_{кр.}$  для трубки  $\varnothing 5,4$  мм, заметно выпадающее из полученной зависимости.

Что же касается трубок диаметром до 3 мм, то есть при  $\frac{d_{з.}}{d_{мп.}} \geq 18$ , то все данные хорошо описываются одной кривой.

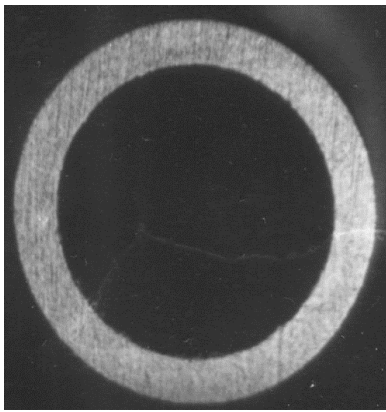
Объяснением этому может служить достаточно большая длина волны по сравнению с характерным размером оболочки. В этом случае зависимость  $R_{кр.}$  от диаметра, если она и существует, оказывается незначительной и находится в пределах погрешности измерений. Полученные результаты существенно расширяют возможности моделирования, поскольку в значительных пределах отпадает необходимость в точном воспроизведении соотношения радиуса заряда к диаметру перекрываемой трубы.

Кроме того, независимость  $R_{кр.}$  от диаметра трубок свидетельствует о том, что они могут использоваться в качестве датчиков давления. Для подтверждения этого были проведены специальные опыты, в которых увеличивался радиус заряда, а диаметр трубок оставался постоянным.

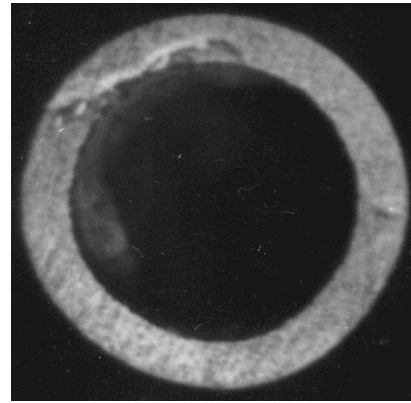
Согласно принципу подобия изменение линейного размера заряда приводит к пропорциональному изменению радиуса ударной волны с заданным давлением. В таблице 3 представлены результаты опытов с трубками, откалиброванными на динамические давления 2300 и 1200 атм. Оба заряда из такой же смеси тротила и гексогена. Таким образом, данные таблицы хорошо удовлетворяют условию подобия.

Сравнение кривых  $P_{кр.} = f(h/r)$  и  $P_{ст.} = f(h/r)$  (см. рисунок 1) показало, что давления, соответствующие потере устойчивости трубок при статическом сжатии, заметно меньше, чем в случае импульсного нагружения, то есть существует коэффициент динамичности, определяемый отношением этих давлений.

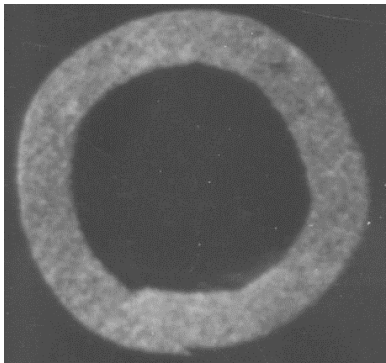




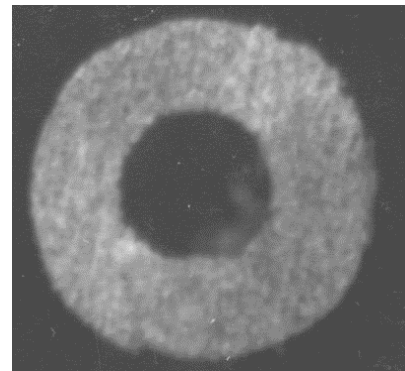
$R = 200 \text{ мм}, P \leq 0,187 \text{ ГПа}$



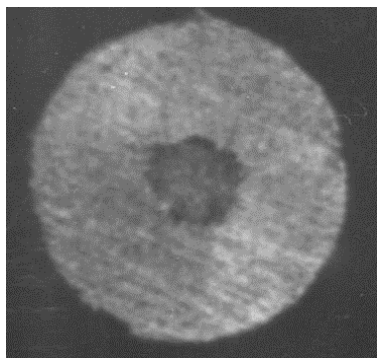
$R = 160 \text{ мм}, P = 0,256 \text{ ГПа}$



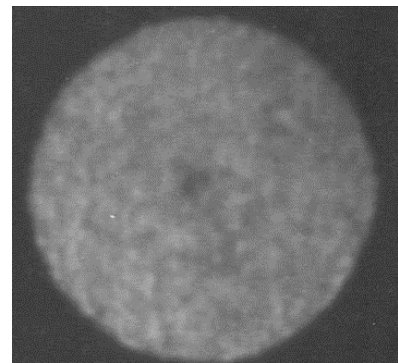
$R = 139 \text{ мм}, P = 0,316 \text{ ГПа}$



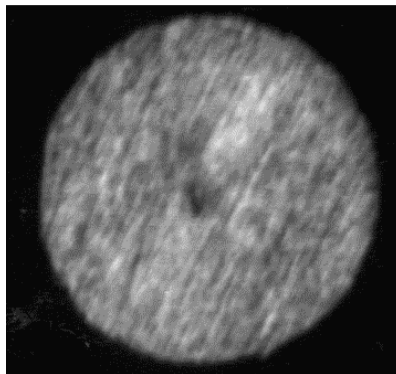
$R = 111 \text{ мм}, P = 0,455 \text{ ГПа}$



$R = 101 \text{ мм}, P = 0,535 \text{ ГПа}$

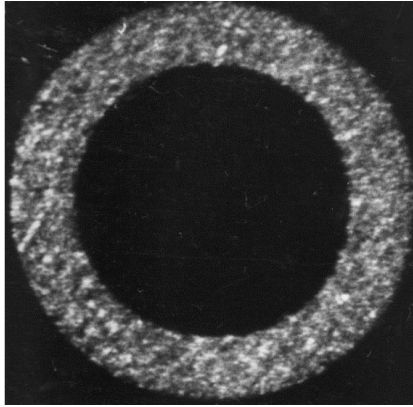


$R = 97 \text{ мм}, P = 0,575 \text{ ГПа}$

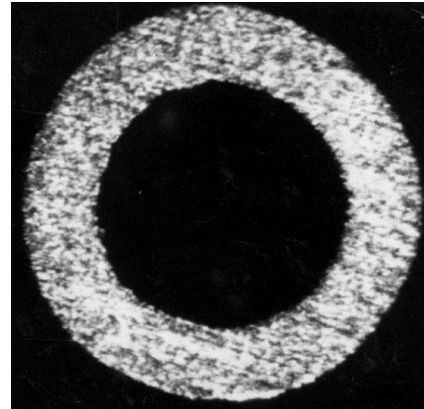


$R = 50 \text{ мм}, P \geq 2,27 \text{ ГПа}$

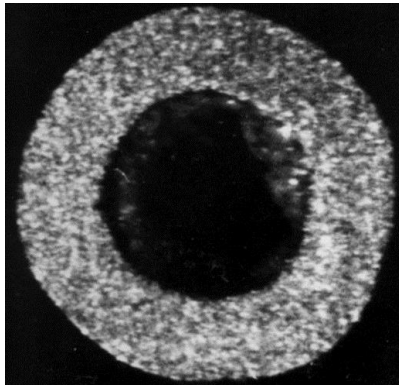
Рисунок 7 – Подводный опыт. Трубка никелевая.  $\varnothing 1,7 \times 0,2$ ,  $h/r = 24 \%$



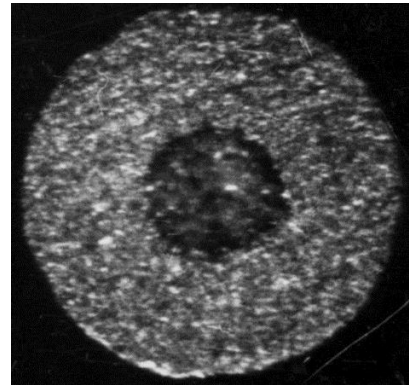
$R = 132 \text{ мм}, P \leq 0,343 \text{ ГПа}$



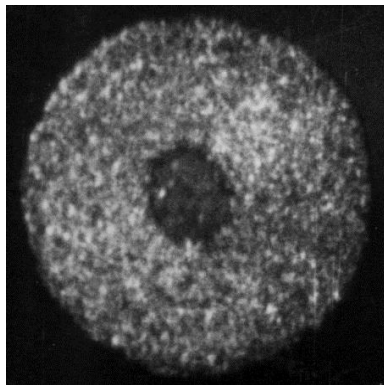
$R = 125 \text{ мм}, P = 0,374 \text{ ГПа}$



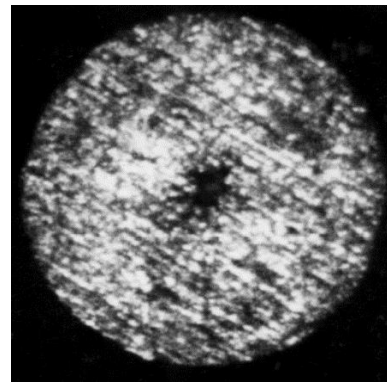
$R = 115 \text{ мм}, P = 0,429 \text{ ГПа}$



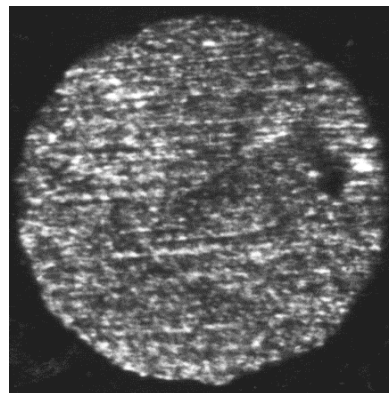
$R = 99 \text{ мм}, P = 0,555 \text{ ГПа}$



$R = 94 \text{ мм}, P = 0,609 \text{ ГПа}$



$R = 90 \text{ мм}, P = 0,659 \text{ ГПа}$



$R = 85 \text{ мм}, P \geq 0,734 \text{ ГПа}$

Рисунок 8 – Подводный опыт. Трубка никелевая.  $\varnothing 1,0 \times 0,15$ ,  $h/r = 30 \%$

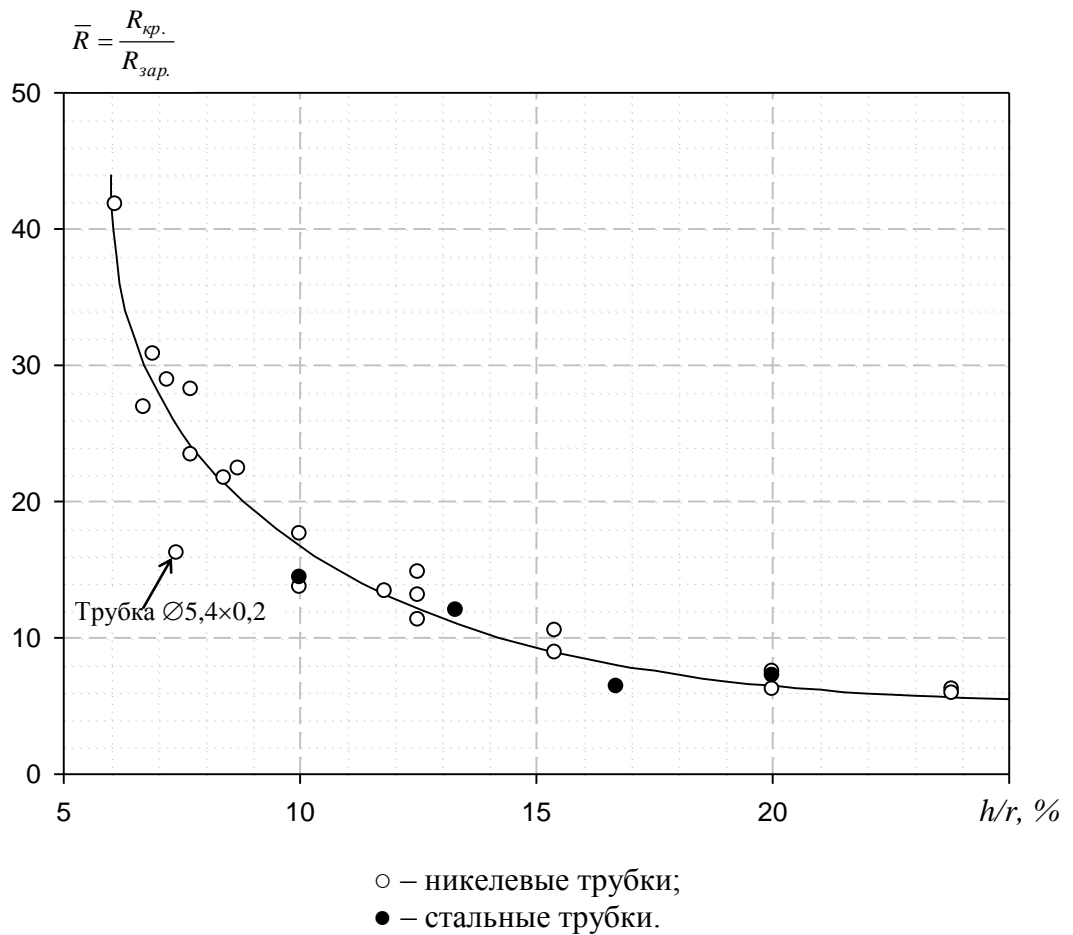


Рисунок 9 – Зависимость  $\frac{R_{кр.}}{R_{зар.}} = f(h/r)$

Таблица 3 Измерение радиуса ударной волны  $R_{кр.}$   
с заданным давлением  $P_{кр.}$

$\varnothing \times h,$ мм	$P_{кр.},$ атм	$R_{зар.},$ мм	$R_{кр.},$ мм	$\frac{R_{кр.}}{R_{зар.}}$
0,85×0,1	2300	27	170	6,3
0,85×0,1	2300	40	254	6,35
0,6×0,05	1200	27	284	10,5
0,6×0,05	1200	40	404	10,1

Из этих же зависимостей следует, что критические давления для стальных и никелевых трубок лежат на одной кривой, независимо от характера нагружения. Это можно объяснить тем, что устойчивость оболочки зависит в основном от ее жесткости, которая определяется модулем упругости материала и геометрической формой. Решение задачи об устойчивости длинной ( $L \gg d$ ) цилиндрической оболочки в линейной постановке дает следующее выражение для критических давлений [7]

$$P = \frac{(n^2 - 1)D}{r^3}, \quad \text{где } D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$$

$\nu$  – коэффициент Пуассона,

$h$  – толщина трубки,

$r$  – радиус трубки,

$E$  – модуль Юнга,

$n$  – число полных волн по окружности.

Минимальное значение  $p$  получается при  $n = 2$

$$P = \frac{3D}{r^3} = \frac{3E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{r}\right)^3$$

$E$  и  $\nu$  для никелевого сплава и стали, согласно справочным данным, практически совпадают.

Большинство экспериментальных результатов получено при радиальном расположении трубок относительно заряда, а еще в начале исследований было установлено, что направление подхода ударной волны не влияет на результаты опытов. В таблице 4 показаны сравнительные значения  $R_{кр.}$  при боковом и радиальном подходе УВ.

Таблица 4 Значения  $R_{кр.}$  при боковом и радиальном подходе УВ

Параметры трубок		$R_{кр.}^{рад.}$ мм	$R_{кр.}^{бок.}$ мм
$\varnothing \times h$ , мм	$h/r$ , %		
1,05×0,1	19,1	48,8	48,0
1,50×0,1	13,3	49,7	55,0
1,00×0,05	10,0	64,3	64,5
1,65×0,05	6,05	89,3	89
2,97×0,07	4,7	97	96

$R_{кр.}^{бок.}$  получены при различных расстояниях трубок от заряда, то есть соответствуют различным углам падения ударной волны к трубке.

Принципиально отличные результаты были получены при нагружении трубок заполненных водой. Одиночные трубки, заполненные водой, сохраняют устойчивость при существенно больших давлениях по сравнению с полыми. В ближней зоне взрыва происходит их разрушение, выражающееся в раскрытии трубок по образующей под действием внутреннего давления (рисунок 10).

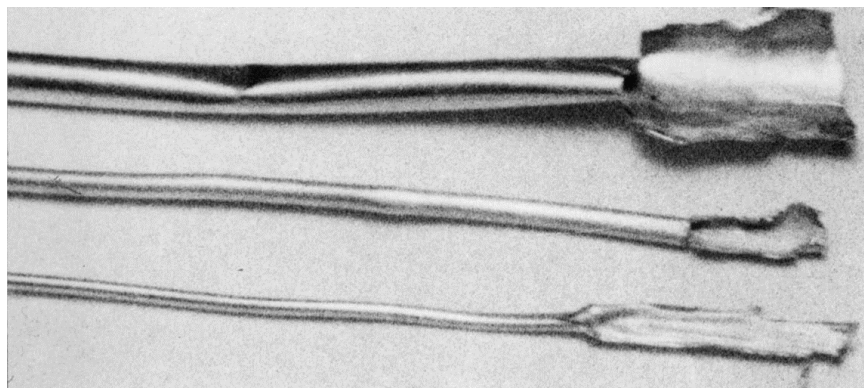


Рисунок 10 – Раскрытие трубок заполненных водой по образующей под действием внутреннего давления

Были проведены серии опытов с полыми и водонаполненными трубками с различными  $h/r$ , в которых регистрировалось расстояние от центра взрыва до начала неповрежденного участка трубки. Результаты опытов показывают, что в случае заполнения трубки выдерживают давления, в  $10-10^2$  превышающие  $P_{кр.}$  для полых.

Раскрытие трубок в ближней зоне объясняется перепадом давлений внутри и вне их, обусловленным тем, что затухание ударной волны внутри трубки с жесткими стенками (волновод) происходит значительно медленнее, чем во внешнем пространстве.

Полученные результаты не зависели от того, открыты или закрыты концы трубок, так как время вытеснения жидкости, определяемое скоростью звука в ней, существенно больше времени действия волны сжатия.

## Выводы

- Исследованы особенности деформации никелевых и стальных трубок с относительной толщиной  $h/r$  от 6 до 30 % в условиях подводного взрыва заряда ВВ.
- Описан гармонический характер потери устойчивости трубок в зависимости от расстояния до заряда. Показано, что при  $h/r \geq 24\%$  трубки при любых давлениях ведут себя как толстостенные цилиндры, то есть происходит их равномерное обжатие без потери устойчивости по гармоникам.
- Установлено, что для трубок с  $h/r < 24\%$  существует четко выраженный переход от зоны полной потери устойчивости к зоне, где заметные остаточные деформации отсутствуют. Это позволяет ввести понятие критического расстояния  $R_{кр.}$ , определяемое как расстояние от центра взрыва до указанной точки перехода.
- Показано, что  $R_{кр.}$  при заданной энергии заряда и при условии  $\varnothing_{заряда}/\varnothing_{трубки} > 18$  однозначно определяются относительной толщиной трубок и не зависит от их диаметра. Это обстоятельство расширяет возможности модельных экспериментов, поскольку в значительных пределах отпадает необходимость точного воспроизведения отношения характерного диаметра заряда к диаметру трубы.
- Увеличение радиуса заряда при фиксированном диаметре трубки приводит к пропорциональному увеличению  $R_{кр.}$
- Возможно использовать трубки в качестве датчиков давления для измерения координат изобарических поверхностей произвольной формы. Примером такого использования являются результаты по исследованию сравнительной эффективности подводного и околоповерхностного взрывов заряда ВВ.
- Водонаполненные трубки, нагруженные ударной волной, выдерживают давления в  $10 \div 10^2$  раз больше, чем полые. В ближней зоне они не перекрываются, а раскрываются под действием внутреннего давления, обусловленного различным коэффициентом затухания ударной волны внутри и вне трубки. Перекрытия трубок при любом давлении и характере их нагружения не происходит.

## Литература

1. Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю. Динамические формы потери устойчивости упругих систем // Докл. АН СССР – 1949 – т.64 – № 6.
2. Христофоров Б.Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов из ТЭНа малого веса // ПМТФ – 1960 – № .
3. Христофоров Б.Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов разной плотности из ТЭНа и азида свинца // ПМТФ – 1961 – № 4.
4. Костюченко В.Н. Параметры ударной волны в воде вблизи сферического заряда ВВ // ПМТФ – 1961 – № 2.
5. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Ленинград: Судпромгиз, 1961.
6. Коул Р. Подводные взрывы. – М: Иностранная литература, 1950.
7. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3 т. под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. т. 3. – М: Машиностроение, 1968.