

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ**  
**УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга**  
**(РЭТЭМ)**

**УТВЕРЖДАЮ**  
Зав. каф. РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.И. Туев

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

**УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В**  
**ТЕХНОСФЕРЕ (Спецкурс)**

**Методические указания по практическим занятиям и самостоятельной**  
**работе**

Разработчик: Профессор  
кафедры РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ И.Е. Хорев

« » \_\_\_\_\_ 2012 г.

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>	<b>стр.</b>
<b>1. Ударные волны в твердых телах</b>	<b>2</b>
<b>2. Аналитические представления ударной адиабаты</b>	<b>5</b>
<b>3. Параметры ударных волн</b>	<b>6</b>
<b>4. Расчет начальных параметров ударной волны</b>	<b>8</b>
<b>5. Распространение и затухание дивергентных ударных волн в различных средах.</b>	<b>10</b>
<b>Задание № 1. Расчет ударных адиабат различных материалов.</b>	<b>11</b>
<b>Задание № 2. Расчет начальных параметров ударных волн при соударении одноплотных материалов.</b>	<b>11</b>
<b>Задание № 3. Расчет начальных параметров ударных волн при соударении разноплотных материалов.</b>	<b>12</b>
<b>Задание № 4. Расчет распространения и затухания ударных волн по степенному закону.</b>	<b>12</b>
<b>Задание № 5. Расчет закономерностей распространения дивергентных ударных волн по формуле для массовой скорости.</b>	<b>12</b>
<b>6. Самостоятельная работа</b>	<b>14</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>14</b>

## **1. Ударные волны в твердых телах**

Ударная волна – это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны называют также сильными разрывами или скачками.

Изучение законов распространения ударных волн в различных материалах имеет большое теоретическое и практическое значение. Данные таких исследований предоставляют нам сведения об уравнении состояния твердых тел в области высоких давлений, что весьма важно практически.

Основной характерной чертой, определяющей поведение твердых и жидких тел при сжатии их ударными волнами, является сильное взаимодействие атомов (или молекул) тела друг с другом, Радиус действия междуатомных сил весьма ограничен. Он порядка размеров самих атомов и молекул, т. е. порядка  $10^{-8}$  см. В достаточно разреженном газе, где средние расстояния между частицами много больше размеров частиц, взаимодействие проявляется в основном только при столкновениях, в момент тесного; сближения атомов или молекул. В твердом и жидком телах атомы или молекулы находятся на близких расстояниях друг от друга и сильно взаимодействуют. Это взаимодействие, в частности, и удерживает атомы в теле. Силы взаимодействия имеют двоякий характер. С одной стороны, частицы, разделенные достаточно большим расстоянием, притягиваются друг к другу; с другой стороны, при более тесном сближении в результате проникновения друг в друга электронных оболочек атомы отталкиваются. Равновесные состояния, на которых находятся атомы твердого тела в отсутствие внешнего давления, соответствуют взаимной компенсации сил притяжения и отталкивания, т. е. минимуму потенциальной энергии взаимодействия. Для того чтобы развести атомы на большие расстояния, необходимо преодолеть силы сцепления и затратить энергию, равную энергии связи, которая для металлов имеет порядок нескольких десятков или сотен ккал/моль. Чтобы сжать вещество, необходимо преодолеть силы отталкивания, которые чрезвычайно быстро возрастают при сближении атомов.

Для того чтобы сжать холодный металл на 10%, необходимо приложить к нему внешнее давление порядка  $10^5$  атм.; сжимаемость обычно уменьшается при повышении давления. Для сжатия металлов вдвое требуются давления порядка нескольких миллионов атмосфер.

Таким образом, при сильном сжатии конденсированного вещества (жидкости или твердого тела) в нем развивается колоссальное внутреннее давление, даже в отсутствие всякого нагревания, только за счет отталкивания

атомов друг от друга. Существование этого давления нетеплового происхождения, совершенно не свойственного газам и определяет основные особенности поведения твердых и жидких тел при сжатии их ударными волнами. В ударных волнах очень большой амплитуды происходит сильное нагревание вещества, приводящее к появлению давления, связанного с тепловым, движением атомов (и электронов), которое называют «тепловым», в отличие от упругого, или «холодного» давления, обусловленного силами отталкивания.

Если амплитуду ударной волны устремить к бесконечности, относительная роль теплового давления возрастает и в пределе упругое давление становится малым по сравнению с тепловым. В волнах чрезвычайно большой амплитуды первоначально твердое вещество ведет себя как газ. Однако в ударных волнах с давлениями в миллионы атмосфер, полученными в лабораторных условиях, давления обоих типов сравнимы друг с другом. В менее сильных волнах, с давлением порядка сотен тысяч атмосфер и ниже, упругое давление преобладает. Мала в этом случае и тепловая энергия вещества, сжатого ударной волной. Вся внутренняя энергия, приобретаемая веществом в волне, затрачивается на преодоление сил отталкивания при сжатии тела и сосредоточена в форме потенциальной, упругой энергии. Скорость распространения малых возмущений в конденсированном веществе, в отличие от газов, никак не связана с температурой. Она определяется упругой сжимаемостью вещества.

В газах мерой «силы» волны служит отношение давлений по обе стороны фронта. В твердом или жидком веществе ударная волна с амплитудой даже в сто тысяч атмосфер является «слабой». Такая волна мало отличается от акустической: она распространяется со скоростью, близкой к скорости звука, сжимает вещество всего на несколько или десятков процентов и сообщает ему скорость за фронтом, в десятки раз меньшую скорости распространения самой волны.

Ударные волны возникают при большом ускорении поверхности слоя металла.

Способ получения таких ускорений – детонация взрывчатого вещества, находящегося в контакте с материалом, либо контакт с быстролетающим снарядом.

Ударный фронт математически представляет собой скачок плотности, энергии и энтропии. Физически, конечно, эти величины должны изменяться в течение времени подъема давления, определяемого такими параметрами как теплопроводность, вязкость, однородностью металла.

Ударно-волновые явления сопровождаются образованием многочисленных трещин, сдвиговых деформаций, отколов, соединение которых при различных начальных параметрах завершает процесс пробития пластины.

Из-за чрезвычайной кратковременности высокоскоростного удара порядка ( $10^{-4}$ - $10^{-7}$ ) секунд и его разрушительного действия в настоящее время основными источниками экспериментальной информации о динамике всего процесса удара являются: скоростная оптическая съемка (обычная и лазерная), импульсное многократное рентгенографирование и фиксация давлений и скоростей преград.

Ослабить сильную ударную волну очень трудно, хотя и заманчиво - решение этой задачи открыло бы большие перспективы.

## **2. Аналитические представления ударной адиабаты.**

В общем случае ударная адиабата представляет связь между параметрами материала на фронте ударной волны с начальными.. Иногда бывает удобно представить ударную адиабату в аналитическом виде, воспользовавшись какой-либо интерполяционной формулой. Опыт показывает, что в широком диапазоне амплитуд ударных волн для большинства твёрдых тел зависимость между скоростью фронта и скоростью вещества за фронтом (относительно невозмущённого) является линейно  $D = C_0 + \lambda U$  . **(2.1).**

Тогда выражение для ударных адиабат можно представляются в виде  $P =$

$$P(U) = \rho_0 DU = \rho_0(C_0 + \lambda U)U \quad (2.2).$$

$$\text{или } P = P(V) = C_0^2(V_0 - V)/(\lambda - 1)^2 V^2 [\lambda/(\lambda - 1) - V_0/V] \quad (2.3.)$$

Значения  $C_0$  и  $\lambda$  представлены в таблице 1.

### 3. Параметры ударных волн

Используя представления механики сплошных среды, зону ударного перехода можно представить как геометрическую поверхность, на которой терпят разрыв функции параметров, характеризующие состояние и движение этой среды. Для простоты представления и выведения законов сохранения массы, импульса и энергии на фронте ударной волны в качестве среды используют газ, хотя это не принципиально. Возьмем газ с постоянной плотностью ( $\rho$ ) и давлением ( $P$ ), который начинают сжимать с постоянной скоростью  $U$ . Найдем неизвестные величины: плотность и давление газа в сжатой области  $P_1$ ,  $\rho_1$ , а также скорость распространения разрыва (ударной волны) по невозмущенному веществу  $D$ , исходя из общих законов сохранения массы, импульса и энергии. К моменту  $t$  в столбе с сечением в  $1 \text{ см}^2$  движение охватывает массу газа, равную  $\rho_0 Dt$ . Эта масса занимает объем  $(D-U)t$ , т. е. плотность сжатого газа удовлетворяет условию:

$$\rho_1(D-U)t = \rho_0 Dt \quad (3.1)$$

Масса  $\rho_0 Dt$  приобретает количество движения  $\rho_0 Dt \cdot U$ , которое по закону Ньютона равно импульсу сил давления. Результирующая сила, действующая на сжатый газ, равна разности давлений со стороны сжатия и со стороны невозмущенного вещества, т.е.

$$\rho_0 Dt \cdot U = (P_1 - P_0)t \quad (3.2)$$

Приращение суммы внутренней энергии и кинетической энергий сжатого газа равно работе внешней силы, сжимающей газ  $P_1 U t$ :

$$\rho_0 D t \left( \varepsilon_1 - \varepsilon_0 + \frac{U^2}{2} \right) = P_1 U t \quad (3.3)$$

Сокращая в этих равенства время  $t$ , получим систему трех алгебраических уравнений для определения трех неизвестных величин  $P_1, \rho_1, D$ .

Преобразуем эти уравнения таким образом, чтобы с левой стороны равенства стояли параметры вещества перед ударной волной, а с правой – параметры за ударной волной. И получим закон сохранения массы (3.4), импульса (3.5) и энергии (3.6) в виде следующих уравнений:

$$\rho_0 U_0 = \rho_1 U_1 ; \quad (3.4)$$

$$P_0 + \rho_0 U_0^2 = P_1 + \rho_1 U_1^2 ; \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_0 + \frac{P_0}{\rho_0} + \frac{U_0^2}{2} = \varepsilon_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{U_1^2}{2} ; \quad (3.6)$$

Вводя удельную энтальпию из уравнения (3.6) получим:

$$\omega_0 + \frac{U_0^2}{2} = \omega_1 + \frac{U_1^2}{2} \quad (3.7)$$

Полученные уравнения представляют собой записанные в наиболее общей форме соотношения между параметрами до и после ударной волны. Они не содержат никаких предположений о свойствах вещества и являются выражением лишь общих законов сохранения массы, импульса и энергии [].

#### 4. Расчет начальных параметров ударной волны

Для удобства и простоты моделирования и дальнейшего анализа необходимо иметь начальные параметры фронта ударной волны при высокоскоростном взаимодействии осколка с преградой в различных диапазонах скоростей, для различных материалов. В данной работе рассчитываются основные начальные параметры ударных волн в металлических преградах.

При возникновении ударной волны справедливы законы сохранения массы, импульса и энергии. Так как давление, действующее на материал преграды и осколок в результате столкновения одинаковое, то можно записать тождество  $P_{\text{в ударнике}} = P_{\text{в преграде}}$ . Давление

$$P = \rho U D, \quad (4.1)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $U$  – массовая скорость вещества,  $D$  – скорость распространения ударной волны.

Поэтому тождество  $P_{\text{в ударнике}} = P_{\text{в преграде}}$  можно записать как

$$\rho_1 U_1 D_1 = \rho_2 U_2 D_2, \quad (4.2)$$

где  $\rho_1$  – плотность материала ударника (осколка),  $\rho_2$  – плотность материала преграды,  $U_1$  – массовая скорость вещества ударника,  $U_2$  – массовая скорость вещества в преграде,  $D_1$  – скорость распространения ударной волны в ударнике,  $D_2$  – скорость распространения ударной волны в преграде.

$$D = C_0 + \lambda U, \quad (4.3)$$

где коэффициенты  $C_0$ ,  $\lambda$  зависят от материалов преграды и ударника и рассчитываются для каждого металла отдельно.

Подставляем (4.3) в (4.2) и получаем

$$C_{01} \rho_1 U_1 + \lambda_1 \rho_1 U_1^2 = C_{02} \rho_2 U_2 + \lambda_2 \rho_2 U_2^2. \quad (4.4)$$

При столкновении разноименных (разноплотных) металлов скорость ударника

$$V = U_1 + U_2. \quad (4.5)$$

Выражаем одну из неизвестных переменных  $U_1$  или  $U_2$  из уравнения (4.5) и подставляем в квадратное уравнение (4.4), упрощаем и с помощью программы Excel найдем общее решение квадратного уравнения.

При столкновении одноименных (одноплотных) металлов процесс нахождения начальных параметров ударных волн намного проще, так как массовая скорость вещества ударника равна массовой скорости вещества в преграде  $U_1 = U_2$  и, следовательно,  $V = 2U$ ,  $U = V/2$ .

В данной работе по вышеизложенной методике необходимо произвести расчет начальных параметров ударных волн при соударении осколка и преграды из различных материалов, использующихся для обшивки космической техники, в диапазоне скоростей от 1 до 15 км/с.

. В качестве материалов осколка и преграды необходимо использовать следующие металлы: титан, сталь, медь, свинец, дюралюминий, магний, никель.

.Примеры расчетов начальных параметров ударных волн при столкновении одноплотных металлов приведены в таблице 2, а при столкновении разноплотных металлов – в таблице 3.

Эти значения можно использовать в качестве тестовых исходных данных для расчёта различных вариантов соударяющихся металлов.

**Таблица 1. Параметры ударных адиабат различных материалов**

Материал	$C_0$ , км/с	$\lambda$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Алюминий	5,3	1,42	2,84
Бериллий	7,998	1,124	1,848
Магний	4,492	1,263	1,738
Магний легированный (сплав AZ-31B)	4,522	1,242	1,74
Титан	5,220	0,767	4,54
Цирконий	3,757	1,018	6,506
Гафний	2,954	1,121	13,31
Ванадий	5,077	1,201	6,11
Ниобий	4,438	1,207	8,57
Тантал	3,414	1,200	16,654
Хром	5,173	1,473	7,18
Медь	3,9	1,5	8,9
Молибден	5,124	1,233	10,22
Вольфрам	4,029	1,237	19,3
Рений	4,184	1,367	21,02
Родий	4,807	1,376	12,41
Свинец	1,97	1,52	12,4
Палладий	3,948	1,588	12,03
Иридий	3,916	1,457	22,5
Платина	3,598	1,544	21,45
Карбид кремния	8,000	0,950	3,21
Карбид вольфрама	4,920	1,339	15,8
Карбид бора	10,695	0,64	2,51
Карбид титана	7,65	0,873	4,85
Железо	3,8	1,58	7,8
Нержавеющая сталь 304L	4,569	1,490	7,95
Полиэтилен	2,901	1,481	0,92
Золото	3,075	1,560	19,5

**Таблица 2– Начальные параметры ударных волн при столкновении одноплотных металлов: сталь, медь, дюралюминий, свинец.**

V км/с	Сталь – Сталь			Медь – Медь			Дюралюминий – Дюралюминий			Свинец – Свинец		
	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	P, ГПа
1	0,5	4,590	17,90	0,5	4,630	20,74	0,5	6,010	8,14	0,5	2,935	16,64

1,5	0,75	4,985	29,16	0,750	4,995	33,57	0,750	6,350	12,91	0,750	3,253	27,65
2	1	5,380	41,96	1	5,360	48,03	1	6,690	18,13	1	3,570	40,47
2,5	1,25	5,775	56,31	1,25	5,725	64,12	1,25	7,030	23,81	1,25	3,888	55,09
3	1,5	6,170	72,19	1,5	6,090	81,85	1,5	7,370	29,96	1,5	4,205	71,50
3,5	1,75	6,565	89,61	1,75	6,455	101,21	1,75	7,710	36,56	1,75	4,523	89,72
4	2	6,960	108,58	2	6,820	122,21	2	8,050	43,63	2	4,840	109,73
4,5	2,25	7,355	129,08	2,25	7,185	144,85	2,25	8,390	51,16	2,25	5,158	131,55
5	2,5	7,750	151,13	2,5	7,550	169,12	2,5	8,730	59,15	2,5	5,475	155,16
5,5	2,75	8,145	174,71	2,75	7,915	195,03	2,75	9,070	67,59	2,75	5,793	180,58
6	3	8,540	199,84	3	8,280	222,57	3	9,410	76,50	3	6,110	207,79
6,5	3,25	8,935	226,50	3,25	8,645	251,74	3,25	9,750	85,87	3,25	6,428	236,80
7	3,5	9,330	254,71	3,5	9,010	282,55	3,5	10,090	95,70	3,5	6,745	267,61
7,5	3,75	9,725	284,46	3,75	9,375	315,00	3,75	10,430	105,99	3,75	7,063	300,23
8	4	10,120	315,74	4	9,740	349,08	4	10,770	116,75	4	7,380	334,64
8,5	4,25	10,515	348,57	4,25	10,105	384,80	4,25	11,110	127,96	4,25	7,698	370,85
9	4,5	10,910	382,94	4,5	10,470	422,15	4,5	11,450	139,63	4,5	8,015	408,86
9,5	4,75	11,305	418,85	4,75	10,835	461,14	4,75	11,790	151,77	4,75	8,333	448,67
10	5	11,700	456,30	5	11,200	501,76	5	12,130	164,36	5	8,650	490,28
10,5	5,25	12,095	495,29	5,25	11,565	544,02	5,25	12,470	177,42	5,25	8,968	533,69
11	5,5	12,490	535,82	5,5	11,930	587,91	5,5	12,810	190,93	5,5	9,285	578,90
11,5	5,75	12,885	577,89	5,75	12,295	633,44	5,75	13,150	204,91	5,75	9,603	625,91
12	6	13,280	621,50	6	12,660	680,60	6	13,490	219,35	6	9,920	674,72

Таблица 3 - Начальные параметры ударных волн при столкновении разноплотных металлов.

V км/с	Титан – Сталь					Титан – Медь				
	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа	U1, км/с	D1, км/с	U2, км/с	D2, км/с	P, ГПа
1	0,567	5,486	0,433	2,850	14,00	0,616	5,542	0,384	4,461	15,37
1,5	0,860	5,821	0,640	3,112	22,56	0,923	5,892	0,577	4,742	24,51
2	1,158	6,160	0,842	3,369	32,15	1,231	6,243	0,769	5,023	34,62
2,5	1,459	6,503	1,041	3,622	42,74	1,538	6,594	0,962	5,304	45,70
3	1,762	6,848	1,238	3,873	54,36	1,846	6,944	1,154	5,585	57,75
3,5	2,066	7,195	1,434	4,121	66,98	2,153	7,295	1,347	5,866	70,77
4	2,372	7,544	1,628	4,368	80,61	2,461	7,646	1,539	6,147	84,76
4,5	2,679	7,894	1,821	4,613	95,25	2,768	7,996	1,732	6,428	99,73
5	2,986	8,244	2,014	4,858	110,90	3,076	8,347	1,924	6,709	115,66
5,5	3,294	8,595	2,206	5,101	127,56	3,383	8,697	2,117	6,990	132,56
6	3,603	8,947	2,397	5,344	145,22	3,691	9,048	2,309	7,271	150,44
6,5	3,912	9,300	2,588	5,587	163,90	3,998	9,398	2,502	7,552	169,28
7	4,222	9,653	2,778	5,829	183,58	4,306	9,749	2,694	7,834	189,10
7,5	4,531	10,006	2,969	6,070	204,26	4,613	10,099	2,887	8,115	209,89
8	4,842	10,359	3,158	6,311	225,96	4,921	10,450	3,079	8,396	231,64
8,5	5,152	10,713	3,348	6,552	248,66	5,228	10,800	3,272	8,677	254,37
9	5,463	11,067	3,537	6,792	272,37	5,536	11,151	3,464	8,958	278,07
9,5	5,774	11,422	3,726	7,033	297,08	5,843	11,501	3,657	9,239	302,74
10	6,085	11,776	3,915	7,273	322,80	6,150	11,851	3,850	9,520	328,38
10,5	6,396	12,131	4,104	7,512	349,53	6,458	12,202	4,042	9,802	354,99
11	6,707	12,486	4,293	7,752	377,26	6,765	12,552	4,235	10,083	382,57

11,5	7,018	12,841	4,482	7,992	406,00	7,073	12,903	4,427	10,364	411,12
12	7,330	13,196	4,670	8,231	435,75	7,380	13,253	4,620	10,645	440,64
12,5	7,642	13,551	4,858	8,470	466,51	7,688	13,604	4,812	10,926	471,13
13	7,953	13,907	5,047	8,709	498,27	7,995	13,954	5,005	11,207	502,59

## 5. Распространение и затухание дивергентных ударных волн в различных средах.

При распространении расходящихся (дивергентных) ударных в материалах они затухают, т.к. энергия ударных волн распространяется на всю больший и больший объём среды. Экспериментально установлено, что в металлах закон падения давления в ударных волнах близких по форме к сферическим (при ударе шарика или компактного цилиндра) описывается степенным законом  $P = P_0 (r_0/r)^n$  (5.1).

Здесь  $P_0$  начальное давление,  $r_0$  - радиус ударяющего шарика или эквивалентного цилиндра. а  $r$  - пройденное ударной волной расстояние в металле. Для магния  $n=1,4$ , для бериллия  $n=1,45$ , для алюминия  $n=1,5$ , для титана  $n=1,6$ , для железа  $n=1,85$ , для меди  $n=1,9$ , для свинца  $n=2,0$ , для тантала  $n=2,1$ , для вольфрама  $n=2,2$ , для золота  $n=2,25$ .

Более точная формула затухания дивергентных ударных волн в металлах имеет вид для массовой скорости:

$$U = U_0 r_0/r \exp[ - k(r - r_0)/r ] , \quad (5.2.)$$

где  $k$  эмпирический коэффициент, который равен для железа- 4,4, для свинца- 3,4, для алюминия 4,5, для титана 4,2, для золота-3,1.

### Задание № 1. Расчёт ударных адиабат различных материалов.

Построить зависимости давления на фронте ударной волны от массовой скорости  $P(U)$  и от начальной плотности  $P(V)$ . Рассмотреть следующие материалы: железо, медь, вольфрам, молибден, свинец, алюминий, титан, медь, тантал, магний.

**Задание № 2. Расчёт начальных параметров ударных волн при соударении одноплотных материалов.**

Провести расчёт начальных параметров ударных волн при соударении следующих металлов: алюминий-алюминий, железо-железо, медь-медь, свинец-свинец, тантал-тантал, бериллий-бериллий, вольфрам-вольфрам, золото-золото, цирконий-цирконий, молибден-молибден и привести таблицу их значений (как показано в таблице 2) в диапазоне скоростей удара 2-16 км/с с интервалом 2 км/с.

**Задание.№. 3. Расчёт начальных параметров ударных волн при соударении разноплотных материалов.**

Провести расчёт начальных параметров ударных волн при соударении следующих металлов: алюминий-железо, железо-медь, медь-свинец, свинец-тантал, тантал-бериллий, бериллий-вольфрам, вольфрам-золото, золото-цирконий, цирконий-молибден, молибден-алюминий и привести таблицу их значений (как показано в таблице 3) в диапазоне скоростей удара 2-16 км/с с интервалом 2 км/с.

**Задание № 4. Расчёт распространения и затухания ударных волн по степенному закону.**

Рассчитать и построить кривую затухания давления на фронте ударной волны в металлических плитах для случая соударения железного шарика диаметром 8 мм с железом, алюминием, титаном, магнием, бериллием, медью, свинцом, танталом, вольфрамом, золотом при скоростях удара 4, 6, 8, 10, 12 и 14 км/с с интервалом по расстоянию 5 мм в плитах толщиной 30 мм.

**Задание № 5. Расчёт закономерностей распространения дивергентных ударных волн по формуле для массовой скорости.**

Рассчитать и построить кривую затухания давления на фронте ударной волны в металлических плитах для случая соударения вольфрамового шарика

диаметром 12 мм с железом, алюминием, титаном, магнием, бериллием, медью, свинцом, танталом, вольфрамом, золотом при скоростях удара 4, 6, 8, 10, 12 и 14 км/с с интервалом по расстоянию 5 мм в плитах толщиной 40 мм.

### **Контрольная работа.**

Выдаться индивидуальное задание каждому студенту из вышеперечисленных вариантов расчётных работ.

**САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА** Самостоятельная работа предполагает работу студентов вне аудитории с учебной и технической литературой, конспектом лекций, методичками по практическим занятиям

Список тем, выделенных на самостоятельное обучение:

1. переход горения в детонацию;
2. взрыв мучной пыли, на примере разрушений элеваторов в США;
3. пожаро — и взрывоопасные материалы и их классификация;
4. нагрузки, создаваемые взрывными волнами на различные конструкции;
5. взрыв газа и газовых баллонов в помещениях;
6. осколочное действие взрыва;
7. пожары на газо и нефтепроводах
8. тепловой взрыв на атомных станциях;
9. критерии поражения различных объектов взрывом;
10. критерии поражения людей.

Студентам необходимо написать реферат на заданную тему объёмом порядка 20 страниц (шрифт 14 пт). Предусмотрена проверка рефератов с выборочным опросом студентов по теме реферата.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Москва. Изд-во: Физматлит, 2008 г., - 656 с.
2. Фортон В.Е. Экстремальные состояния вещества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010 г. - 304 с.
3. Фортон В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. Научная лекция при вручении большой Международной золотой медали им. А. Эйнштейна по физике. М.: Изд-во «БУКОС», 2005 г., - 91 с.
4. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. Учебное пособие. Москва. Изд – во: Физматлит, 2008г., - 304 стр.