

SECTION 7. Mechanics and machine construction.



Denis Alexandrovich Chemezov
Master of Engineering and Technology,
Lecturer of Vladimir Industrial College, Russia
chemezov-da@yandex.ru

Vladimir Vladimirovich Goremykin
Student of Vladimir Industrial College, Russia
vladimir_goremykin@mail.ru

Anzhelika Vladimirovna Bayakina
Lecturer of Vladimir Industrial College, Russia
bajakina.anzhelika@yandex.ru

THE RESEARCH OF SHOCK WAVE OF THE EXPLOSION DAMAGE EFFECT ON STRUCTURES

Abstract: This article analyzes the dynamics of the shock wave propagation in air from the explosions of different capacities explosives. The level of shock wave overpressure at the moment of the explosion and 120 ms after the explosion have been assessed.

Key words: explosive, shock wave, overpressure, mixture.

Citation: Chemezov DA, Goremykin VV, Bayakina AV (2014) THE RESEARCH OF SHOCK WAVE OF THE EXPLOSION DAMAGE EFFECT ON STRUCTURES. ISJ Theoretical & Applied Science 9 (17): 54-61. doi: <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2014.09.17.9>

УДК 662.215.23

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ВЗРЫВА НА СООРУЖЕНИЯ

Аннотация: В статье проведен анализ динамики распространения ударной волны в воздушном пространстве от взрыва различных по мощности взрывчатых веществ. Дана оценка величины избыточного давления ударной волны в момент и на 120 мс после взрыва.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, ударная волна, избыточное давление, смесь.

Взрывом является физико-химический процесс частичного преобразования объема энергии в механическую работу за короткий промежуток времени, сопровождающийся ударными и тепловыми воздействиями на окружающую среду [1]. Основными поражающими факторами при взрыве взрывчатых веществ (ВВ) являются ударная волна (УВ) и динамически изменяющееся со временем тепловое поле, действующие в радиусе поражения.

УВ взрыва действующая в какой-либо среде, описывается в виде сферических слоев энергии (сжатых областей) движущихся с высокими скоростями в пространстве. Избыточное давление УВ возникает в результате взаимодействия максимального давления (фаза сжатия) УВ с атмосферным давлением (фаза разряжения) рассматриваемой среды, где произошел взрыв. Степень разрушения различных по назначению зданий, сооружений и т. д. оценивают по критерию физической устойчивости (сильное – элементы сооружений

разрушаются полностью, среднее и слабое – возможно восстановление элементов сооружений в короткие сроки) [2].

Целью исследования явилось определение величины избыточного давления УВ взрыва наиболее распространенных ВВ методом моделирования процесса и анализ степени разрушения зданий и сооружений от ее действия, в различных временных диапазонах.

Моделирование распространения УВ взрыва выполнялось в специальной программе инженерного анализа (явной динамики) Ansys Autodyn для следующих ВВ: *ANFO* (смесь нитрата аммония и дизельного топлива), ρ (плотность) = 0,931 г/см³; *BTF* (бензотрифуроксан), ρ = 1,859 г/см³; *C-4* (смесь гексогена 91%, полиизобутилена 2,1%, диоктилсебацата 5,3% и моторного масла спецификации SAE 10 1,6%), ρ = 1,601 г/см³; *Comp A-3* (смесь гексогена 91% и воска 9%), ρ = 1,65 г/см³; *Cyclotol* (смесь гексогена и тротила), ρ = 1,754 г/см³; *DIPAM* (3,3'-диамино-2,2',4,4',6,6'-гексанитродифенил), ρ = 1,55 г/см³; *EL-506C* (смесь ТЭН 85% и пластификатора 15%), ρ = 1,48 г/см³; *Explosive D* (пикрат аммония), ρ = 1,42 г/см³; *FEFO* (бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)формаль), ρ = 1,59 г/см³; *H-6* (смесь гексогена, тринитротолуола, алюминиевой пудры и парафина), ρ = 1,76 г/см³; *HMX* (октоген), ρ = 1,891 г/см³; *HMX-TNT* (смесь октогена и тротила), ρ = 1,776 г/см³; *HNS 1.00* (гексанитростильбен), ρ = 1 г/см³; *HNS 1.40* (гексанитростильбен), ρ = 1,4 г/см³; *HNS 1.65* (гексанитростильбен), ρ = 1,65 г/см³; *LX-01* (смесь нитрометана 51,7%, тетранитрометана 33,2% и 1-нитропропана 15,1%), ρ = 1,23 г/см³; *LX-04-1* (смесь октогена 85% и витона-А 15%), ρ = 1,865 г/см³; *LX-07* (смесь октогена 90% и витона-А 10%), ρ = 1,865 г/см³; *LX-09-1* (смесь октогена 93,3%, бис-(2,2-динитропропил)-формаль 4,4% и бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формаль 2,3%), ρ = 1,84 г/см³; *LX-10-1* (смесь октогена 94,5% и витона-А 5,5%), ρ = 1,865 г/см³; *LX-11* (смесь октогена 80% и витона-А 20%), ρ = 1,875 г/см³; *LX-14-0* (смесь октогена 95,5% и витона-А 4,5%), ρ = 1,835 г/см³; *LX-17-0* (смесь триаминотринитробензола 92,5% и Kel-F 800 7,5%), ρ = 1,9 г/см³; *NM* (нитрометан), ρ = 1,128 г/см³; *Octol* (смесь октогена и тротила), ρ = 1,821 г/см³; *PBX-9010* (смесь гексогена 90% и Kel-F 3700 10%), ρ = 1,787 г/см³; *PBX-9011* (смесь октогена 90%, Estane 5% и 5703-FI 5%), ρ = 1,777 г/см³; *PBX-9404-3* (смесь октогена 94%, нитроцеллюлозы 3% и CEF 3%), ρ = 1,84 г/см³; *PBX-9407* (смесь гексогена 94% и FPC461 6%), ρ = 1,6 г/см³; *PBX-9501* (смесь октогена 95%, Estane 2,5% и бис-(2,2-динитропропил)-формаль 2,5%), ρ = 1,84 г/см³; *PBX-9502* (смесь триаминотринитробензола 95% и Kel-F 800 5%), ρ = 1,895 г/см³; *Pentolite* (смесь тринитротолуола и тетранитропентаэритрита), ρ = 1,7 г/см³; *PETN 0.88* (пентрит), ρ = 0,88 г/см³; *PETN 1.26* (пентрит), ρ = 1,26 г/см³; *PETN 1.5* (пентрит), ρ = 1,5 г/см³; *PETN 1.77* (пентрит), ρ = 1,77 г/см³; *RX-03-BB* (смесь ТАТБ 92,5% и Kel-F 7,5%), ρ = 1,9 г/см³; *RX-04-DS* (смесь октогена 80%, алюминия 10% и витона-А 10%), ρ = 1,865 г/см³; *RX-23-AA* (смесь гидразиннитрата 79% и гидразина 21%), ρ = 1,42 г/см³; *RX-23-AB* (смесь гидразиннитрата 70%, гидразина 5,9% и воды 24,1%), ρ = 1,38 г/см³; *RX-23-AC* (смесь гидразиннитрата 30% и гидразина 70%), ρ = 1,13 г/см³; *Tetryl* (2,4,6-тринитрофенилметилнитрамин), ρ = 1,73 г/см³; *TNT* (тринитротолуол), ρ = 1,63 г/см³; *X-0219* (смесь ТАТБ 90% и Kel-F 800 10%), ρ = 1,92 г/см³; *XTX-8003* (смесь ТЭН 80% и двухкомпонентной силиконовой резины Sylgard 182 20%), ρ = 1,54 г/см³ [3].

Моделирование осуществлялось в двумерной постановке (осевая симметрия). Был построен квадрат с размерами сторон 100000 × 100000 мм (рис. 1), соответствующий воздушному пространству (состояние среды – идеальный газ; ρ = 0,001225 г/см³; T (температура) = 288,2 К; U (внутренняя энергия среды при давлении 1 бар) = 206800 Дж), в котором происходил процесс взрыва. Высокая точность расчетов определялась разбиением фигуры на 15251 узел (15000 элементов). В левом нижнем углу квадрата располагалось ВВ в виде прямоугольника (на рисунке изображено зеленым цветом) с размерами сторон 1000 × 600 мм. Расчет процесса производился Эйлеровым решателем. Принятое максимальное время моделирования процесса – 120 мс, максимальное количество циклов – 99999999.

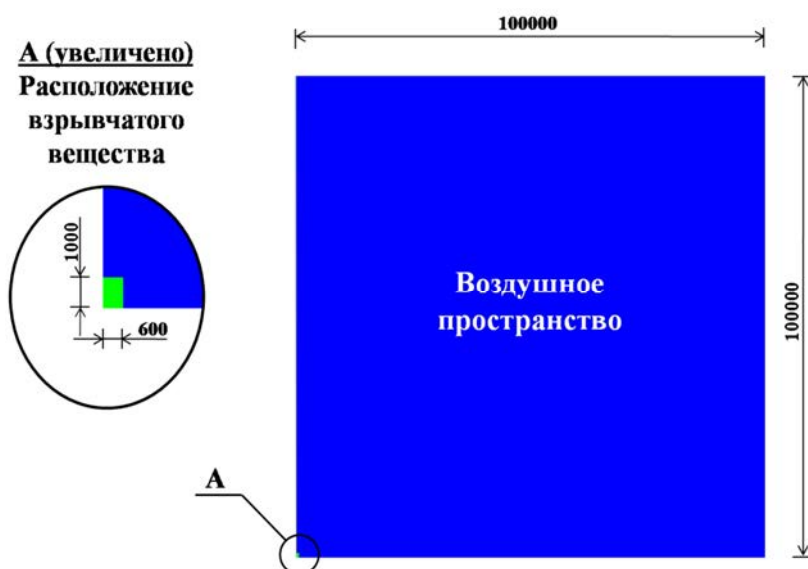


Рисунок 1 – Постановка задачи (размеры даны в мм).

Решение задачи производилось в интерактивном режиме. Получены эпюры, описывающие последовательное распространение УВ и величину избыточного давления после взрыва TNT (рис. 2) на:

τ_1 (расчетное время после взрыва) = 1,19 мс / $P_{1изб.мах.}$ (максимальное избыточное давление) = 48,95 МПа / r_1 (радиус действия УВ) = 6 м;

$\tau_2 = 2,85$ мс / $P_{2изб.мах.} = 3,554$ МПа / $r_2 = 10,4$ м;

$\tau_3 = 6,49$ мс / $P_{3изб.мах.} = 1,857$ МПа / $r_3 = 16,8$ м;

$\tau_4 = 13,04$ мс / $P_{4изб.мах.} = 847$ кПа / $r_4 = 24,8$ м;

$\tau_5 = 20,03$ мс / $P_{5изб.мах.} = 508$ кПа / $r_5 = 30,4$ м;

$\tau_6 = 23,66$ мс / $P_{6изб.мах.} = 443,5$ кПа / $r_6 = 31,2$ м;

$\tau_7 = 28,81$ мс / $P_{7изб.мах.} = 376,3$ кПа / $r_7 = 37,2$ м;

$\tau_8 = 34,81$ мс / $P_{8изб.мах.} = 369$ кПа / $r_8 = 38,8$ м;

$\tau_9 = 45,93$ мс / $P_{9изб.мах.} = 271,4$ кПа / $r_9 = 44,4$ м;

$\tau_{10} = 58,24$ мс / $P_{10изб.мах.} = 231,9$ кПа / $r_{10} = 48,8$ м;

$\tau_{11} = 72,24$ мс / $P_{11изб.мах.} = 204,7$ кПа / $r_{11} = 57,2$ м;

$\tau_{12} = 87,12$ мс / $P_{12изб.мах.} = 184,8$ кПа / $r_{12} = 66$ м;

$\tau_{13} = 102,1$ мс / $P_{13изб.мах.} = 170,4$ кПа / $r_{13} = 72,8$ м;

$\tau_{14} = 117,1$ мс / $P_{14изб.мах.} = 160,3$ кПа / $r_{14} = 77,2$ м;

$\tau_{15} = 120$ мс / $P_{15изб.мах.} = 158,6$ кПа / $r_{15} = 78$ м.

Эпюры распространения УВ на 120 мс после взрыва некоторых ВВ представлены на рис. 3.

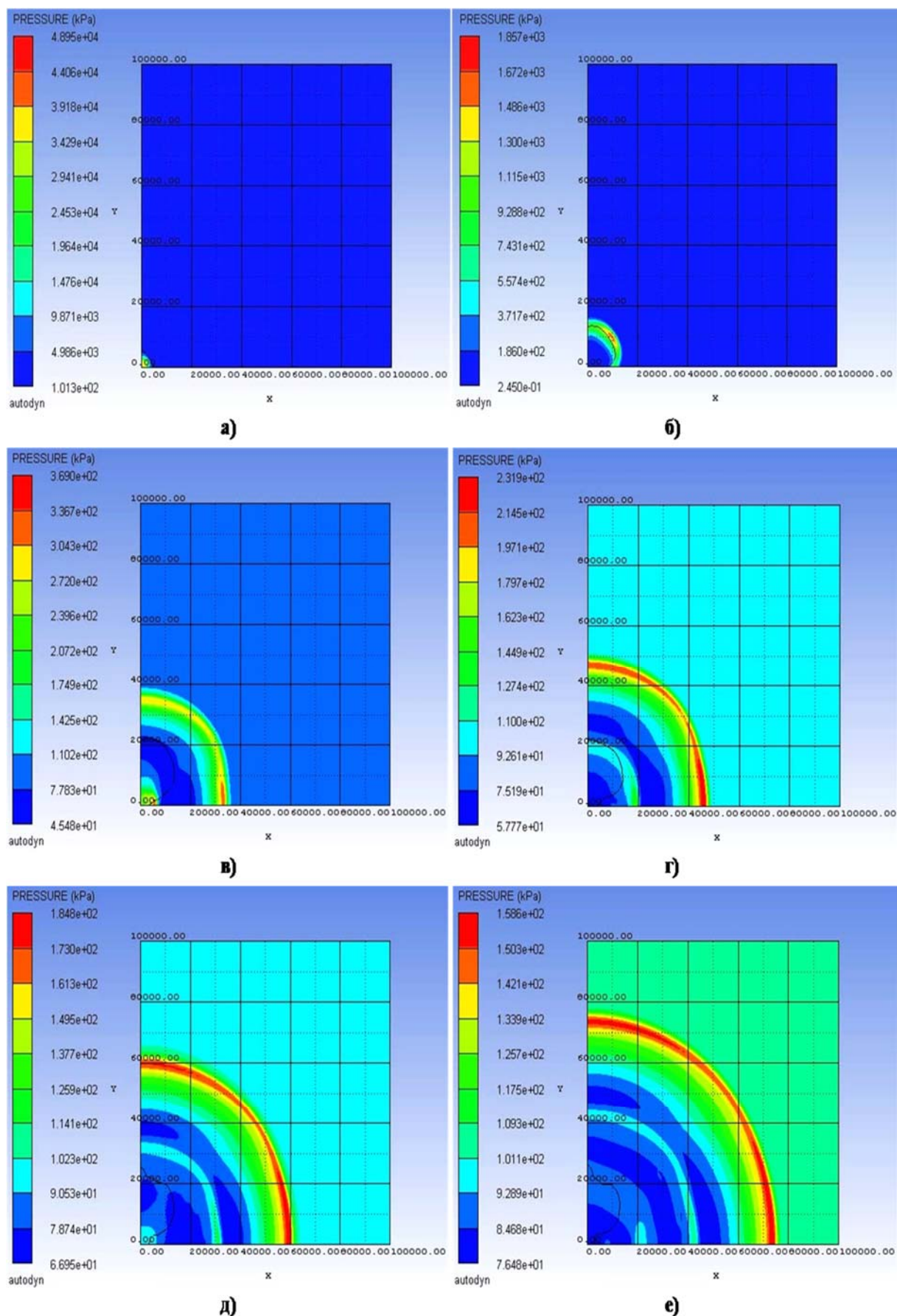


Рисунок 2 – Эпюры распространения УВ после взрыва TNT: а – $\tau = 1,19$ мс; б – $\tau = 6,49$ мс; в – $\tau = 34,81$ мс; г – $\tau = 58,24$ мс; д – $\tau = 87,12$ мс; е – $\tau = 120$ мс.

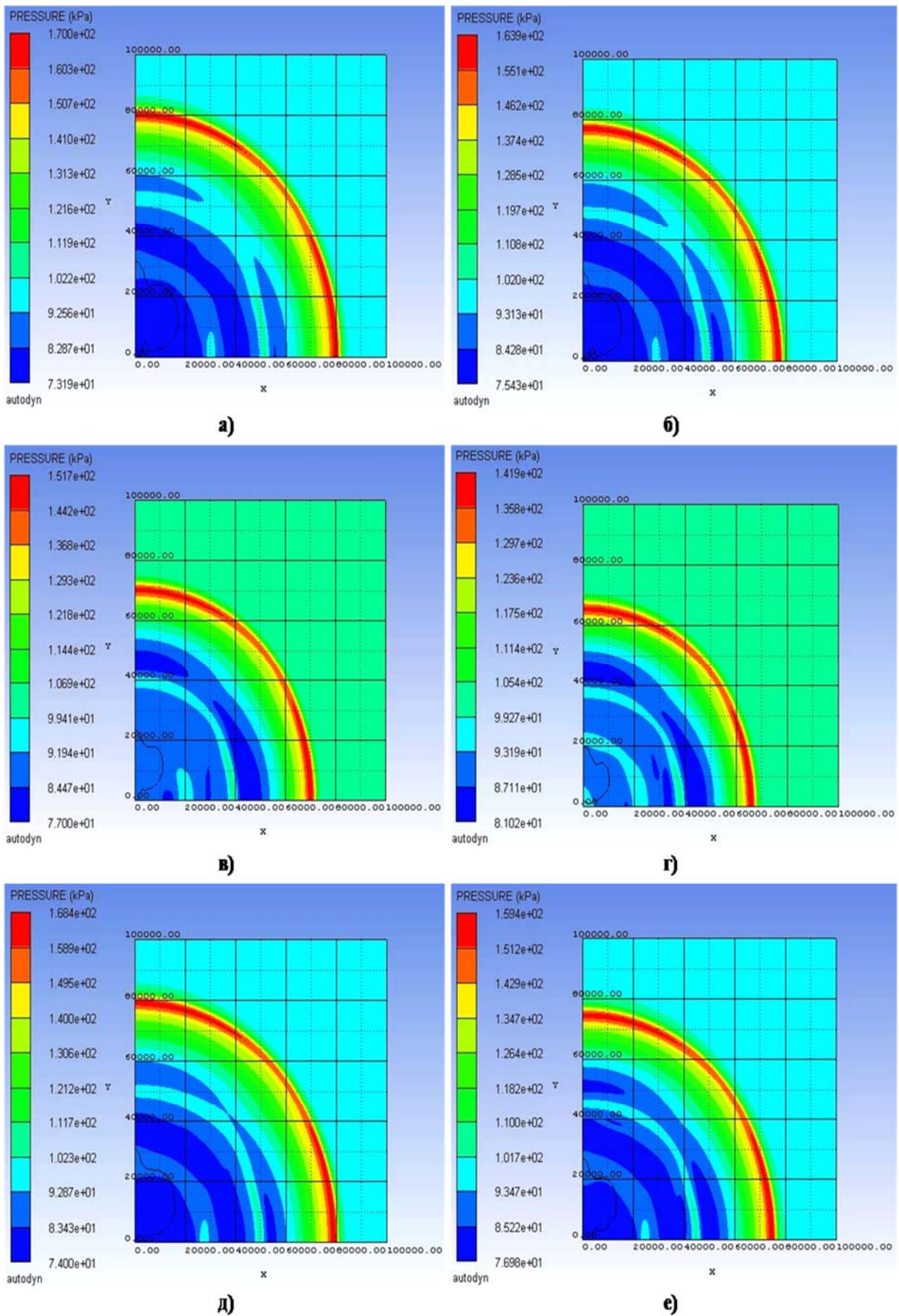


Рисунок 3 – Эпюры распространения ударной волны на 120 мс после взрыва: а – BTF; б – PBX-9407; в – RX-23-AB; г – ANFO; д – HMX; е – XTX-8003.

Выделение тепла при химической реакции является одним из необходимых условий взрыва. При этом температура воздушного пространства постоянно изменяется уже после 30 мс после начала взрыва (рис. 2, в). При быстром и сильном сжатии ВВ нагреваются и выделяют большое количество энергии с образованием газообразных продуктов. Образующиеся газообразные продукты производят резкий удар по соседним слоям ВВ. Эти слои сжимаются, и в них также образуется УВ. Она имеет впереди резко очерченный фронт, на котором происходит сильное повышение избыточного давления и температуры. За фронтом УВ происходит превращение ВВ в газообразные продукты и выделение энергии. Продукты взрыва не удаляются из зоны реакции, а движутся в направлении распространения процесса вслед за УВ (рис. 2 в – е) [4, 6, 7].

Результаты имитационного моделирования процесса взрыва ВВ отображены в сводной табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса взрыва

Номер п/п	Наименование ВВ	Величина	Величина	Радиус
		избыточного давления УВ в момент взрыва, МПа	избыточного давления УВ на 120 мс после взрыва, кПа	действия УВ на 120 мс после взрыва, м
1	LX-09-1	89,34	169,4	85,6
2	BTF	88,54	170	86,4
3	LX-10-1	88,34	169,6	86,0
4	RX-04-DS	87,1	169,9	85,6
5	LX-14-0	86,75	169,1	85,2
6	PBX-9404-3	86,54	168,9	85,6
7	PBX-9501	86,51	168,8	85,2
8	HMX	86,02	168,4	85,6
9	LX-04-1	82,12	168	84,0
10	Octol	80,81	167,7	84,4
11	LX-07	79,46	167,4	85,2
12	Cyclotol	75,11	166,5	84,4
13	PBX-9010	74,74	165,7	83,6
14	PETN 1.77	73,28	166,4	82,0
15	LX-11	72,72	165,6	84,0
16	Comp A-3	71,37	164,7	83,6
17	PBX-9011	71,27	164,9	84,0
18	HMX-TNT	69,78	165,2	83,6
19	PBX-9407	68,29	163,9	83,6
20	C-4	66,87	163	84,8
21	H-6	65,89	164,5	80,8
22	FEFO	65,42	163,4	82,4
23	PBX-9502	65,15	162,1	80,8
24	Pentolite	64,84	164	83,6
25	PETN 1.5	63,56	162,4	88,4
26	Tetryl	63,26	162,7	80,4
27	LX-17-0	63,24	162,5	80,0
28	RX-03-BB	60,3	161,7	79,6
29	HNS 1.65	59,65	161,8	82,4
30	X-0219	58,61	161,6	79,6
31	XTX-8003	55,1	159,4	82,0

32	RX-23-AA	54,62	158,2	80,8
33	PETN 1.26	51,03	158	82,4
34	DIPAM	50,52	159	82,0
35	TNT	48,95	158,6	78,0
36	EL-506C	48,63	157,3	78,0
37	LX-01	46,58	156,6	80,8
38	HNS 1.40	45,68	156,7	82,0
39	Explosive D	43,41	155,3	80,8
40	RX-23-AB	38,38	151,7	74,8
41	NM	37,43	152,8	76,0
42	RX-23-AC	35,85	149,5	74,4
43	PETN 0.88	30,56	149,2	74,4
44	HNS 1.00	27,08	147,4	73,2
45	ANFO	17,38	141,9	70,4

При одинаковых условиях, отмечено: наибольшая величина избыточного давления УВ в момент взрыва у *LX-09-1* (89,34 МПа), наибольшая величина избыточного давления УВ на 120 мс после взрыва у *BTF* (170 кПа), наибольший радиус действия УВ на 120 мс после взрыва у *PETN 1.5* (88,4 м). Наименьшие показатели наблюдаются у *ANFO*.

Оценка степени разрушения средств транспорта, мостов, производственных и коммунально-энергетических сооружений в зависимости от действия избыточного давления УВ и удаленности от эпицентра взрыва приводилась для ВВ *TNT* [5, 8, 9, 10]:

- 1) Многоэтажные железобетонные здания с большой площадью остекления
 $r = 1 \dots 30$ м – полное, $r = 31 \dots 60$ м – полное, $r = 31 \dots 90$ м – сильное;
- 2) Здания ГЭС
 $r = 1 \dots 30$ м – сильное, $r = 31 \dots 60$ м – среднее, $r = 31 \dots 90$ м – слабое;
- 3) Сооружения коммунального хозяйства без ограждающих конструкций
 $r = 1 \dots 30$ м – полное, $r = 31 \dots 60$ м – сильное, $r = 31 \dots 90$ м – слабое;
- 4) Воздушные линии низкого напряжения
 $r = 1 \dots 30$ м – полное, $r = 31 \dots 60$ м – сильное, $r = 31 \dots 90$ м – сильное;
- 5) Легковые автомобили
 $r = 1 \dots 30$ м – полное, $r = 31 \dots 60$ м – полное, $r = 31 \dots 90$ м – полное;
- 6) Железнодорожные пути
 $r = 1 \dots 30$ м – сильное, $r = 31 \dots 60$ м – среднее, $r = 31 \dots 90$ м – слабое;
- 7) Металлические мосты с длиной пролета 30 ... 45 м
 $r = 1 \dots 30$ м – полное, $r = 31 \dots 60$ м – сильное, $r = 31 \dots 90$ м – слабое;
- 8) Шоссейные дороги с асфальтовым покрытием
 $r = 1 \dots 30$ м – среднее, $r = 31 \dots 60$ м – слабое, $r = 31 \dots 90$ м – слабое.

В результате комплексного анализа процесса моделирования взрыва ВВ были получены следующие выводы:

- 1) значительное уменьшение (более чем в 10 раз) избыточного давления УВ происходит во временном диапазоне от 1 до 3 мс после взрыва ВВ;
- 2) размер радиуса действия УВ на 120 мс после взрыва не зависит от величины избыточного давления УВ в момент взрыва (например, *PETN 1.5* $P_{изб.мах.} = 63,56$ МПа, $r = 88,4$ м, а *BTF* $P_{изб.мах.} = 88,54$ МПа, $r = 86,4$ м);
- 3) незначительному повреждению от УВ подвергаются объекты, состоящие из металлических элементов, имеющие наименьшую высоту.

References:

1. (2014) Vzryv, Available: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%C2%E7%F0%FB%E2> (date of access: 10.09.2014).
2. (2014) Raschet nagruzok sozdavaemyh udarnoy volnoy, Available: <http://pastuhova-diplom.ru/index.php?id=37> (date of access: 10.09.2014).
3. Chemezov D. A. (2014) Description of library materials software package Ansys Autodyn. ISJ Theoretical & Applied Science 8 (16): 4-23.
4. (2014) Fiziko-himicheskie osnovy vzryvnykh prevrasheniy, Available: http://coudget.3dn.ru/news/2_4_fiziko_khimicheskie_osnovy_vzryvnykh_prevrashhenij/2013-03-30-59 (date of access: 10.09.2014).
5. (2014) Stepeni razrusheniya ob'ekta pri razlichnykh izbytochnykh davleniyah udarnoy volny, Available: <http://lektsiopedia.org/lek-15942.html> (date of access: 10.09.2014).
6. (2014) Vzryvchatye veshstva, Available: <http://www.lki.ru/text.php?id=6332> (date of access: 10.09.2014).
7. (2014) Fizika vzryva, Available: <http://www.mining-enc.ru/f/fizika-vzryva> (date of access: 10.09.2014).
8. (2014) Prognozirovaniye i otsenka obstanovki pri chrezvychaynykh situatsiyah tehnogennoy haraktera, Available: http://edu.dvgups.ru/METDOC/ENF/BGD/BGD/MU/USH_POS/frame/4.htm (date of access: 10.09.2014).
9. (2014) Stepen-razrusheniye-zdaniya, Available: <http://www.ngpedia.ru/id480981p1.html> (date of access: 10.09.2014).
10. (2014) Otsenka posledstviy vzryva, Available: <http://www.studfiles.ru/preview/749105/> (date of access: 10.09.2014).