

## Лекция III

### Основни явления, протичащи при взрив на заряд ВВ

От опит е известно, че действието на взрива на компактен заряд ВВ на произволно разстояние, което надминава неговия характерен размер, е еквивалентно на действието на взрива на сферичен заряд със същата маса. В случай че дължината на заряда е много по-голяма от неговите размери в другите две направления, действието на взрива на разстояния от порядъка на средните стойности на най-малките размери е еквивалентно на действието на взрива на сферичен заряд със същата маса. В този случай на неголеми разстояния от челната страна, взривът на удължения заряд е еквивалентен на взрива на заряда на определена маса, която е доста по-малка, отколкото масата на заряда, затворена в тръбата.

По такъв начин за извършване на анализ на ефективността на взрива на заряда под една или друга форма на достатъчно големи разстояния можем да използваме съответстващите закономерности, отговарящи на зарядите със сферична или цилиндрична форма. Самото действие на взрива в непосредствена близост до заряда трябва да се разглежда по специален начин. Трябва да отбележим, че от голям интерес е и изследването на закономерностите на плоския взрив (например при действието на взривовите на листовите заряди, които се инициират едновременно по цялата повърхност). Ще изясним основните физични закономерности, които са характерни за взрива.

Ако взривът се извършва във вакуум, то продуктите на взрива, които са съгъстени в началния момент до определено налягане (вследствие на това, че в обема на заряда се е отделила топлина), започват безпрепятствено да се разширяват, като се подчиняват на законите на нестационарното течение. Разширяването на продуктите на взрива във вакуум при отсъствие на сили на привличане ще продължава неограничено време. В този случай във всеки един момент от време разпределението на налягането, плътността и скоростта на разширяващите се продукти на взрива на различни разстояния от мястото на взрива ще бъдат различни. Налягането и плътността ще бъдат най-малки във външните области и най-големи – във вътрешните области на продуктите на взрива, а скоростта на газа, напротив, ще бъде най-голяма във външните области и най-малка във вътрешните. В случая със сферичен заряд скоростта в центъра на взрива очевидно ще бъде равна на нула, в случай на взрив с произволна форма във вътрешните области също винаги ще има много точки с нулева скорост.

Важно е да отбележим, че най-голямата скорост на разпръскване на продуктите на взрива ще отговаря на скоростта изместване на границите на разпространение на продуктите на взрива, тъй като при разпръскването на продуктите на взрива в празното пространство плътността и налягането на тази граница са равни на нула. Тази най-голяма скорост на изтичане на газовете  $u_{max}$  зависи от формата на взривяващия се заряд, от закономерностите на протичане на самия процес на взрива, а също така и от енергията на взривното превръщане  $Q$ . Между  $u_{max}$  и енергията на взрива в случая със сферичния заряд, когато продуктите на взрива представляват сами по себе си газ, има следната зависимост:

$$u_{max} = (3\bar{k} - 1) \sqrt{\frac{2Q}{\bar{k}^2 - 1}},$$

където  $\bar{k}$  е средният показател на адиабатата при процеса на разширяване.

За типичните ВВ  $Q = 1 \text{ kcal/g}$ ,  $k = 5/4$ ,  $u_{max} \approx 11000 \text{ m/s}$ .

При хипотезата за мигновена детонация:

$$\bar{u}_{max} = 2 \sqrt{\frac{\bar{k}Q}{\bar{k} - 1}},$$

което за типичните ВВ дава:  $\bar{u}_{max} = 9000 \text{ m/s}$ .

В случай на взрив на кондензирани ВВ, когато продуктите на взрива в началния стадий не са идеален газ, тези прости формули се заменят от някои малко по-сложни. Величините с най-голяма скорост на изтичане си остават почти непроменени, тъй като при реална детонация  $u_{max} \approx 13000 \text{ m/s}$ ; при мигновена детонация  $u_{max} \approx 10000 \text{ m/s}$ . При детонация на по-мощни ВВ (например, хексоген) пределните скорости на изтичане достигат  $15000 \text{ m/s}$ .

В случай на взрив в каквато и да е среда процесът на разпространение на продуктите на взрива ще произтича по малко по-различен начин, отколкото при разпръскване във вакуум. При разпръскване на продуктите на взрива на границата на заряда ще започнат да взаимодействат с обкръжаващата заряда среда. В случай на много плътна среда границата на отделяне между заряда и средата ще започне бавно да се движи от центъра на заряда. Ако процесът на взрива е протичал по детонационен начин, то продуктите на детонацията, които се движат зад фронта на детонационната вълна, ще имат скорост доста по-висока от границата на отделяне и струпвайки се на нея ще се свиват. Ако средата не е много плътна, то границата на разделяне между продуктите на детонацията и средата ще се движи по-бързо от продуктите на детонацията и налягането в тях ще спада. В съответствие с това могат да възникнат два принципно различни режима на разпространение. В първия разглеждан случай по продуктите от детонацията ще премине ударна вълна от границата на разделянето в дълбочина, която е следствие от удара на продуктите от детонацията в средата. Във втория случай по продуктите на взрива веднага ще премине вълна на разреждане. В средата във всеки случай ще премине ударна вълна.

По такъв начин изучаването на разпространението на продуктите на взрива в каквато и да е среда значително се усложнява в сравнение с изучаването на разпръскването във вакуум и като говорим за полето на взрива<sup>1</sup> в първия случай трябва да определим параметрите не само на продуктите от детонацията, но и на средата, която е въввлечена в движението.

Все пак дори и без да развиваме теории за разпръскване на продуктите на взрива, можем да оценим разстоянието, на което действието на продуктите на взрива вече практически няма да се проявява, а също така и разстоянието, на което ще действа ударната вълна, която се разпространява в средата, заобикаляща източника на взрива.

В началото ще разгледаме няколко параметъра на взрива във въздуха. Преди всичко е очевидно, че при взрив в неограничена среда продуктите на взрива след изминаване на известен период от време от началото на разпръскването ще заемат пределния обем  $v_{\infty}$ , който отговаря на остатъчното налягане на продуктите на взрива, което е равно на налягането на околната среда (атмосферното)  $p_{\alpha}$ . Ако средното начално налягане на продуктите на взрива при мигновена детонация е:

$$\bar{p} = \frac{\rho_0 D^2}{8} = 2\rho_0 Q$$

<sup>1</sup> Под поле на взрива ще разбираме пространството, във всяка точка от което можем еднозначно да определим всички параметри, които характеризират продуктите на взрива (налягане, плътност, температура, скорост и др.). Полето на взрива ще бъде неопределено (нестационарно), докато във всяка точка всички негови параметри се променят с времето.

(в случай, че показателят на изоентропата за продуктите на взрива  $k = 3$ ) и остатъчното налягане е  $p_\infty = p_\alpha$  при  $v = v_\infty$ , то е лесно да определим пределния обем при следните съображения. За типичните ВВ до налягане  $p_k \approx 2000 \text{ kg/cm}^2$ , продуктите на взрива, както е известно се разширяват по закона:

$$pv^3 = \text{const} = \bar{p}_H v_0^3 = p_k v_k^3,$$

където  $v_k$  е обемът, съответстващ на налягането  $p_k$ .

При  $p < p_k$ , както вече бе казано, смятаме, че разширяването се извършва по закона:

$$pv^k = \text{const} = p_k v_k^k = p_\alpha v_\alpha^k,$$

където  $k = 1,2 \div 1,4$ .

Свързването на двата закона при  $\rho_k \approx 2000 \text{ kg/cm}^2$  се извършва по уравнението на състоянието на продуктите на взрива и уравнението на съхранение на енергията. Следователно:

$$\frac{v_\infty}{v_0} = \left(\frac{\bar{p}_H}{p_k}\right)^{1/3} \left(\frac{p}{p_\alpha}\right)^{1/n},$$

където  $v_0$  е началният обем на продуктите на взрива.

За типичните ВВ  $\rho_0 = 1,6 \text{ g/cm}^3$  и  $D = 7000 \text{ m/s}$ , тогава  $\bar{p}_H \approx 100000 \text{ kg/cm}^2$ .

Като положим  $p_\alpha = 1 \text{ kg/cm}^2$  ще се получи:

$$\text{при } k = \frac{7}{5}: v_\infty/v_0 = 50^{\frac{1}{3}} \cdot 2000^{\frac{5}{7}} = 3,7 \cdot 220 \approx 800;$$

$$\text{при } k = \frac{5}{4}: v_\infty/v_0 = 50^{\frac{1}{3}} \cdot 2000^{\frac{4}{5}} \approx 1600.$$

По такъв начин, продуктите на взрива на типичните ВВ се разширяват приблизително  $800 \div 1600$  пъти. Поради това в случая със сферичния взрив пределният радиус на обема, който се заема от продуктите на взрива, ще бъде  $10 \div 12$  пъти по-голям от началния радиус на заряда. За цилиндричния взрив това съотношение ще бъде равно приблизително на  $30 \div 40$ . По този начин можем да установим, че самото действие на продуктите на взрива е ограничено до не много големи разстояния. Към това трябва да добавим, че вследствие на нестационарността на процеса на разширение на продуктите на взрива, те ще достигат пределната граница чрез редица затихващи колебания около тази граница; отначало продуктите на взрива се разширяват и заемат най-големия обем, който надминава пределния (с  $30 \div 40\%$ ), и така средното налягане в тях ще бъде по-малко от  $p_\alpha$ , след това външното налягане ще ги свие до налягане, което е малко по-голямо от  $p_\alpha$  и т.н. Все пак има смисъл да разберем, че има единствено процес на първо разширяване и първо свиване, след което процесът практически се прекратява.

Сега ще отбележим, че в действителност границата на разделяне между продуктите на взрива и средата, която в началото е доста изразена, с течение на времето става все по-размита, доколкото зад фронта на ударната вълна движението ще бъде вихрено; в околностите на границите на разделянето възниква турбулентна област на течение на газа, която ще размива границата на разделянето. „Дифузията” на продуктите на взрива в средата все пак ще протича доста бавно и единствено след приключване на процеса на разпръскване ще се извърши цялостното разместване на продуктите на взрива от средата. Поради това за първия стадий на разпръскването имаме основания да говорим за наличие на граница на разделяне. Като знаем пределния обем, при първото приближение можем да определим енергията  $E_\infty$ , която „се установява” в продуктите на взрива:

$$E_\infty = \frac{p_\alpha v_\infty}{k - 1}.$$

Доколкото началната енергия на взрива ( $E_H$ ) се определя от съотношението:

$$E_H = \rho_0 v_0 Q = MQ,$$

където  $M$  е масата на ВВ, то енергията, която преминава в средата (в ударната вълна), ще бъде:

$$E_{yд} = E_H - E_\infty = M \left( Q - \frac{p_\alpha v_\infty}{(k-1)\rho_0 v_0} \right).$$

Следователно:

$$E_{yд}/E_H = 1 - \frac{p_\alpha \left( \frac{v_\infty}{v_0} \right)}{((k-1)\rho_0 Q)}.$$

Като приемем за типичните ВВ  $Q = 1 \text{ kcal/g}$ ,  $\rho_0 = 1,6 \text{ g/cm}^3$  и като имаме предвид по-рано изчислените стойности  $v_\infty = v_0$  ще намерим, че:

$$\text{при } k = \frac{7}{5}: E_{yд}/E_H = 0,97;$$

$$\text{при } k = \frac{5}{4}: E_{yд}/E_H = 0,91.$$

По такъв начин преобладаващата част от енергията на взрива преминава в средата, която обкръжава областта на взрива. Тук се разбира, че вследствие на покачване на ентропията и съответното намаляване на свободната енергия, в ударната вълна преминава значително малка част от енергията на взрива, отколкото може да се предположи по направените изчисления. Както показахме по-горе, част от продуктите на взрива ще се придвижват към центъра до достигане на състояние на равновесие и ще носят около 1/3 от енергията на взрива. Следователно в основната ударна вълна ще премине само около 2/3 от енергията на взрива. Освен това повърхностният слой на ВВ в редица случаи изгаря с непълно отделяне на енергия ( $E_H$ ), което още повече намалява количеството на енергията, която преминава в ударната вълна.

В този случай, когато продуктите на взрива сами по себе си са идеален газ, пределният обем се изчислява по формулата  $v_\infty/v_0 = (\bar{p}_H/p_\alpha)^{1/k}$ . Доколкото:

$$\bar{p}_H = (k-1)\rho_0 Q = \frac{\rho_0 D^2}{2(k+1)},$$

в ударната вълна преминава енергия:

$$E_{yд} = MQ \left( 1 - \frac{p_\alpha}{(k-1)\rho_0 Q} \left( \frac{(k-1)\rho_0 Q}{p_\alpha} \right)^{1/k} \right).$$

Коефициентът на преминаване на енергия в ударната вълна ще бъде:

$$\frac{E_{yд}}{E_H} = 1 - \frac{p_\alpha}{(k-1)\rho_0 Q} \left( \frac{(k-1)\rho_0 Q}{p_\alpha} \right)^{1/k}$$

В случай че  $Q = 1 \text{ kcal/g}$ ,  $\rho_0 = 1,6 \text{ g/cm}^3$  и  $k = 7/5$ , ще имаме  $E_{yд}/E_H = 0,94$ . В случая  $k = 5/4$ :  $E_{yд}/E_H = 0,86$ . По такъв начин изчисленията, които са направени за идеалния и неидеалния газ, практически съвпадат.

Преминаваме към приблизителната оценка на областта на въпросното действие на ударната вълна при взрив във въздуха. При удара на продуктите от детонацията във въздуха началното налягане във фронта на ударната вълна достига  $700 \div 1000 \text{ kg/cm}^2$  като това налягане бързо спада с времето. Както е известно, за ударната вълна скоростта на разпространение на нейния фронт  $D_{yд}$  и скоростта на течение на газа зад фронта на вълната  $u_{yд}$  са свързани със съотношението:

$$u_{уд} = \frac{2D_{уд}}{\gamma + 1} \left( 1 - \frac{c_{\alpha}^2}{D_{уд}^2} \right),$$

където:  $c_{\alpha}$  е скоростта на звука в несмушаван въздух;

$\gamma$  – показател за изоентропия на въздуха.

При разпространение на ударната вълна доста бързо се установява такъв режим, при който от границата на разделянето до фронта скоростта на течение на газа във вълната се увеличава приблизително линейно. Като вземем предвид, че при разширяване на продуктите на взрива скоростта на фронта на вълната е  $(\gamma + 1)/2$  пъти по-бърза от скоростта на границата на разделяне ще намерим разстоянието, преминало от фронта на ударната вълна, което ще бъде по-малко от действителното, т.е. трябва с известна степен да намалим действителните размери на областта, която е заета от ударната вълна, тъй като скоростта на фронта на ударната вълна надвишава скоростта на границата на разделяне с повече от  $(\gamma + 1)/2$  пъти. Това намалено разстояние, както се вижда, ще бъде също така  $(\gamma + 1)/2$  пъти по-голямо от разстоянието, изминато от границата на разделяне. Дължината на ударната вълна ще бъде  $(\gamma + 1)/2 - 1 = (\gamma - 1)/2$  пъти по-малка от това разстояние. Следователно, за сферичния взрив обемът  $v_{уд\infty}$ , заеман от ударната вълна, при  $v = v_{\infty}$  ще се определя от съотношението:

$$v_{уд} \geq \left( 1 - \left( 1 - \frac{(\gamma - 1)}{2} \right)^3 \right) v_{\infty}.$$

Оттук като разлагаме по ред и пренебрегваме членовете на 2-я и 3-я ред на малките стойности при  $\gamma = 7/5$  ще получим:

$$v_{уд} \geq \frac{3}{2} (\gamma - 1) v_{\infty} = 0,6 v_{\infty} \approx 500 v_0.$$

По такъв начин въздушната ударна вълна към момента на завършване на процеса на разширяване на продуктите на взрива ще „стои“ на тяхната повърхност във вид на относително тънък слой. Самата енергия на въздуха, която се намира в този слой, в сравнение с енергията на взрива, която преминава в ударната вълна, може да се пренебрегне, доколкото енергията на взрива в единици обем е равна на  $6,832/(k - 1)$  kJ, а енергията на въздуха в целия обем (при  $v_0 = 1$ ) е равна на  $50/(\gamma - 1)$  J.

По такъв начин отношението на енергията на въздуха към енергията на взрива е равно на 0,0075. Средното налягане на въздуха в ударната вълна, ако смятаме цялата енергия за задържана, ще бъде:

$$\bar{p}_{ср} \leq \frac{(\gamma - 1)\rho_0 Q v_0}{v_{\infty}} = 50 \text{ kg/cm}^2.$$

От казаното по-горе следва, че при сферичния взрив на разстояние на пределното разширение на продуктите от центъра на взрива от порядъка на  $10 \div 12r_0$ , средното налягане в ударната вълна ще бъде от порядъка на  $50 \text{ kg/cm}^2$ . По-нататък налягането ще започне да спада приблизително обратнопропорционално на квадрата на разстоянието ( $p \sim r^{-2}$ ), което при разстояние  $25r_0$  се получава  $\bar{p}_{уд} \approx 10 \text{ kg/cm}^2$ .

По-нататъшното спадане на налягането ще бъде по-малко интензивно, а самата ударна вълна вече няма да е силна. Поради това, ако разрушението се определя от налягането на ударната вълна, то разстоянието  $25 \div 30r_0$  може да се смята за пределно по смисъла на нейното силово въздействие върху средата, която обкръжава източника на взрива. Импулсът на ударната вълна (който се отделя) се променя приблизително пропорционално на  $r^{-1}$ , доколкото продължителността на действието на ударната вълна е пропорционална на  $r_0$ .

Ако се вземе предвид плътността и потенциала на ВВ и се приеме, че разрушаването се определя от налягането, то разстоянието на пределното действие на ударната вълна е пропорционално на  $M^{1/3}Q$ . При импулсно разрушение това разстояние е пропорционално на  $M^{2/3}\sqrt{Q}$ .

За цилиндричен взрив:

$$v_{уд} \geq (\gamma - 1)v_{\infty} \approx 0,4v_{\infty} \approx 300v_0;$$

на разстояние от порядъка  $30 \div 40r_0$ :  $\bar{p}_{уд} \leq 80 \text{ kg/cm}^2$ .

По закон спадането на налягането до  $\bar{p}_{уд} \approx 10 \text{ kg/cm}^2$  ще бъде  $p \sim r^{-3/2}$ . По такъв начин при  $10 \text{ kg/cm}^2$  налягането ще бъде достигнато на разстояние от порядъка на  $150r_0$ . Разстоянието на пределното действие на ударната вълна за налягането е пропорционално на  $\sqrt{MQ}$ , а за импулсите  $M^{4/3}Q$ .

В случая на плосък взрив:

$$v_{уд} \geq \frac{\gamma - 1}{2}v_{\infty} \approx 0,2v_{\infty} \approx 150v_0.$$

На разстояние от порядъка на  $1000r_0$  средното налягане е  $\bar{p}_{уд} \leq 150 \text{ kg/cm}^2$  по-нататъшното спадане на налягането е до налягане от порядъка на  $30 \text{ kg/cm}^2$  и ще се извършва според закона  $p \sim r^{-1}$ . По-нататък налягането ще спада по-бавно ( $p \sim r^{-1/2}$ ). Разстоянието на пределното действие на взрива според налягането е пропорционално на  $MQ$ . Импулсът на ударната вълна в случая с плоския взрив даже при  $r \rightarrow \infty$  си остава краен.

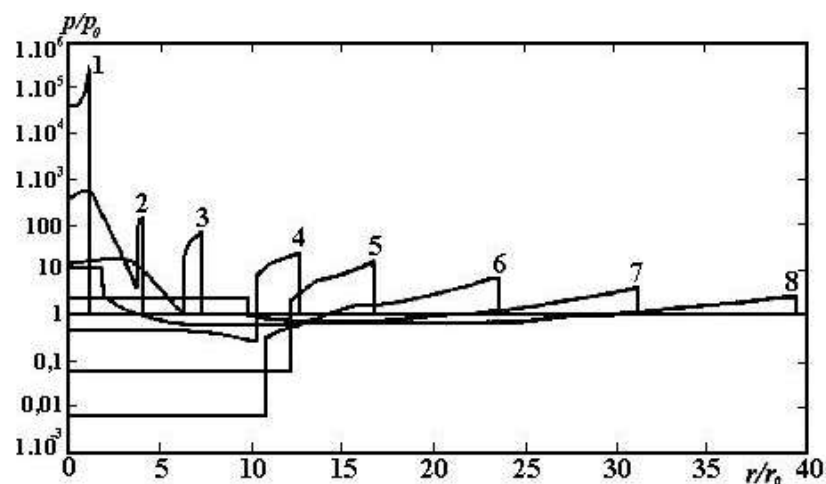
Практически при наличието на загуба на енергия, натрупваща се във времето (основно вследствие на увеличаване на ентропията) действието на ударната вълна, особено в случая на плоския взрив, ще се проявява на разстояния, които са значително по-малки от изчислените. По-детайлна картина на възникващото течение дава възможност за получаване на числено моделиране на процеса на взрива на заряда ВВ. По-горе изследването на сферичния и цилиндричния взрив с помощта на метода на характеристиките води до откриване на явлението на „вторична“ ударна вълна. Оказва се, че характеристиките в опашката на вълната на разреждане, която преминава в продуктите на взрива, се пресичат, което говори за възникване на ударна вълна, която се разпространява от контактната повърхност към центъра на симетрията.

На фигури 3.1÷3.4 са дадени разпределенията в областта на течение на относителните налягания, масовата скорост, плътността и температурата при взрива на сферичния заряд на тротил със стандартна плътност  $1600 \text{ kg/m}^3$  и скорост на детонацията  $7000 \text{ m/s}$  и с отделена топлина на взрива  $4,2 \text{ MJ/kg}$  в последователните моменти от време  $1 \div 8$ . В ролята на мащаби на измеренията на параметрите на графиките са приети атмосферното налягане  $p_a = 0,1013 \text{ МПа}$ , плътността на въздуха  $\rho_a = 1,225 \text{ kg/m}^3$  при температура  $T_a = 288 \text{ К}$ , скорост на звука  $c_a = 340 \text{ m/s}$  и радиус на заряда  $r_0$ .

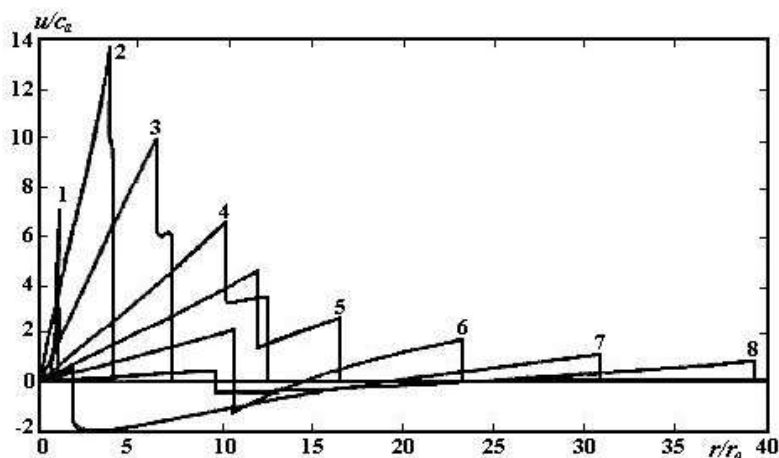
Задачата следва да се решава с помощта на метода на големите частици на мрежата с общо число на килийките  $10^4$ . Детонацията вътре в заряда се пресмята чрез използването на най-простата (линейна във времето) кинетика, ето защо на разпределенията 1, които съответстват на момента на излизане на вътрешната детонация на повърхността на заряда, присъства зона на химична реакция (поред на 10 килийки) с повишени параметри на фронта (химичен пик).

След края на разрива още на началния етап на разпространение на въздушната ударна вълна (разпределение 2) в продуктите от детонацията (ПД) се формира вторична вълна, на чийто фронт налягането, плътността и температурата нарастват със скокове, а масовата скорост пада. Вторичната УВ се отделя от контактната повърхност на ПД-

въздух и все пак на началния етап (разпределения 3, 4 и 5) тя се свързва с разпръсващите се продукти от центъра на взрива и едва след това (6) започва да се придвижва към центъра на симетрията. Според мярката на разпространение на интензивността на вторичната УВ се увеличава и при изкривяване в центъра на симетрията достига много големи величини (теоретично се стреми към безкрайност), при което във вълната на разреждане пред фронта на вторичната вълна налягането и плътността на ПД спадат до величини  $10^{-3} \div 10^{-2}$  от атмосферните, а температурата става по-ниска от началната.

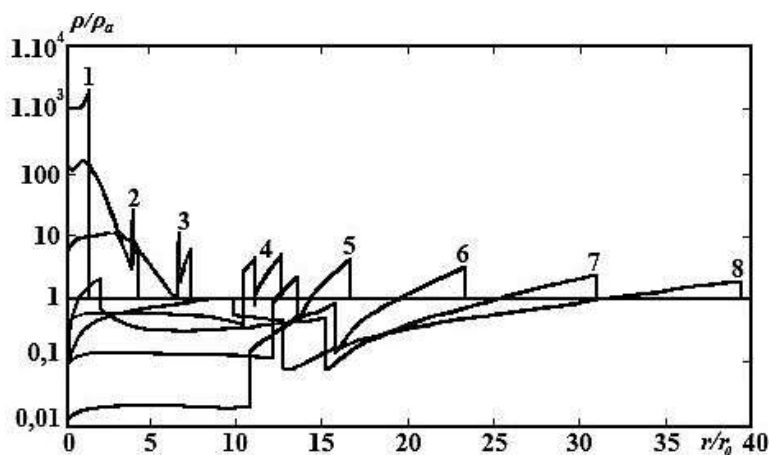


Фигура 3.1. Разпределение на налягането в областта на течение в случая на сферичния взрив на заряд ТНТ; 1÷8 – последователни моменти от време.

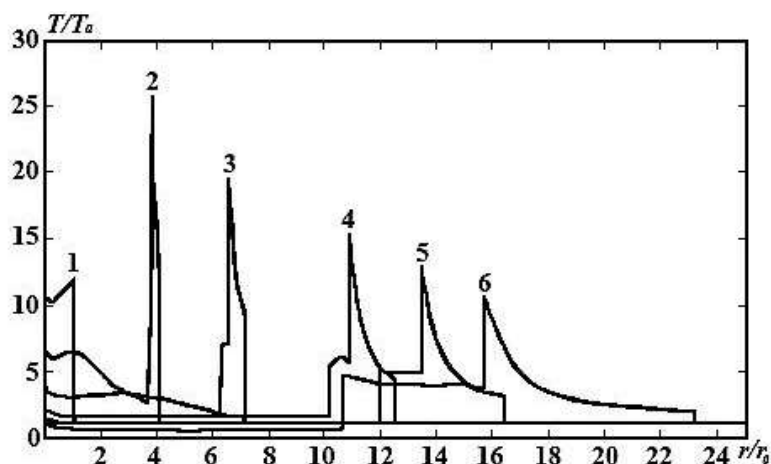


Фигура 3.2. Разпределение на масовата скорост в областта на течение при сферичен взрив на заряд ТНТ; 1÷8 – последователни моменти от време.

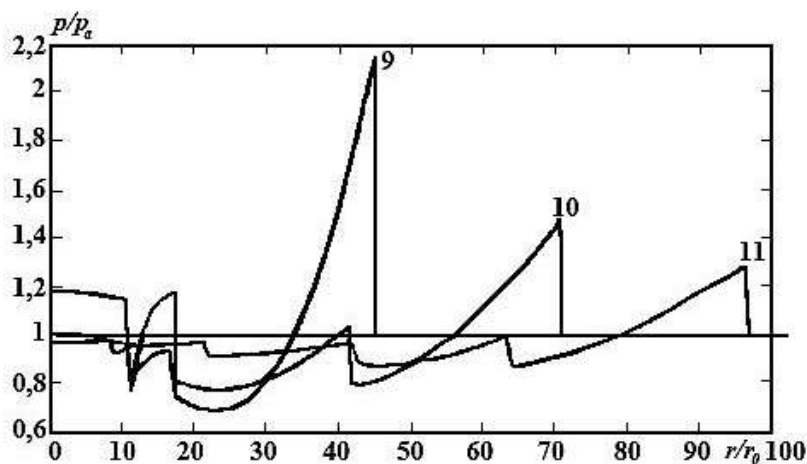
След отразяване на вторичната УВ от центъра на симетрията (7) тя започва да се разпространява след основната с намаляваща интензивност и се връща към контактната повърхност на ПД-въздух (8). При разпределението на плътността (фиг. 3.3) и температурата (фиг. 3.4) добре се вижда контактният разрыв, при който при преминаване от ПД към въздуха плътността бързо спада до 6÷8 пъти, а температурата нараства до 2,8÷3,5 пъти. В областта между повърхността на мехурчето на ПД и фронта на УВ с увеличаване на разстоянието плътността на въздуха нараства, а температурата спада. Максималният радиус на разширяване на ПД е примерно 16 радиуса на заряда. На графиките на фигури 3.3 и 3.4 в центъра на симетрията е видна област на намаляване на плътността и повишаване на температурата, което е следствие от присъствието в задачата на „инициатор” (малка централна област с повишени начални параметри за формиране на инициращата УВ).



Фигура 3.3. Разпределение на плътността в областта на течение при сферичен взрив на заряд ТНТ; 1÷8 – последователни моменти от време.



Фигура 3.4. Разпределение на температурата в областта на течение при сферичен взрив на заряд ТНТ; 1÷6 последователни моменти от време.



Фигура 3.5. Разпределение на налягането при сферичен взрив на заряд ТНТ на по-късен етап от процеса; 9÷11 – последователни моменти от време.

На фигура 3.5 за по-късните моменти от време (9, 10 и 11) са представени разпределенията на налягането в областта на течение. След излизане на вторичната УВ на повърхността на мехурчето на ПД произтича разпад на произволен разрыв и във въздуха излиза УВ, а в ПД – вълна на разреждане (разпределение 9), в чиято опашка се формира втора вторична вълна. Този процес се повтаря многократно (10) и в края на краищата във въздуха се формира основна УВ, във фазата на разреждане на която присъства две вторични вълни, които постепенно изостават от фронта ù (11).