

Лекция XXI

Взаимодействие на ударната вълна с повърхността и дъното на водоема

1. Влияние на свободната повърхност върху полето на налягане при подводен взрив

При взрив на относително неголеми дълбочини на потапяне на заряда съществено влияние върху параметрите на възникващото хидродинамично поле оказва свободната повърхност на течността. В момента на съприкосновението на УВ със свободната повърхност възниква пречупена вълна на свиване във въздуха и отразена вълна на разреждане във водата. Вследствие на значителната разлика в стойностите на акустичната твърдост на средата, скоростта на движение на частиците на свободната повърхност се оказва почти двойно по-голяма от скоростта на частиците зад фронта на вълната в безграничната среда.

Движението на течността с увеличена скорост води до намаляване на нейната плътност, което на свой ред води до спадане на налягането. Като се разпространява с местната скорост на звука, това смущение образува съвкупност от елементарни вълни на понижаване на налягането с различна амплитуда (характеристики).

Ако измерването се извършва на малки относителни разстояния от епицентъра на взрива, то разликата в скоростите на разпространение на характеристиките е несъществена и решението на задачата с акустично приближение става възможно. В този случай граничните условия на свободната повърхност се свеждат до наслагането на две полета с различен знак. Най-простият метод е методът на огледалното изображение на източника и на оттичането, чиято същност е лесно да бъде изяснена чрез фигура 21.1.a. Правата вълна се разглежда като смущение, свързано чрез своя произход с източника, а отразената – с мнимото оттичане с еквивалентна интензивност в горната полу-плоскост.

Тъй като с акустично приближение полето на налягане на правата вълна се изразява чрез зависимостта:

$$\Delta p(t, r) = \Delta p_m(r) f\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \sigma_0\left(t - \frac{r}{c_0}\right), \quad (21.1)$$

където:

$$r = \sqrt{x^2 + (h - z)^2};$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \frac{r}{c_0} \\ 1, & \text{при } t \geq \frac{r}{c_0} \end{cases}$$

то полето на налягането в резултат на това ще бъде:

$$\Delta p = \Delta p_m(r) f\left(t - \frac{r}{c_0}\right) \sigma_0\left(t - \frac{r}{c_0}\right) - \Delta p_m(R) f\left(t - \frac{R}{c_0}\right) \sigma_0\left(t - \frac{R}{c_0}\right), \quad (21.2)$$

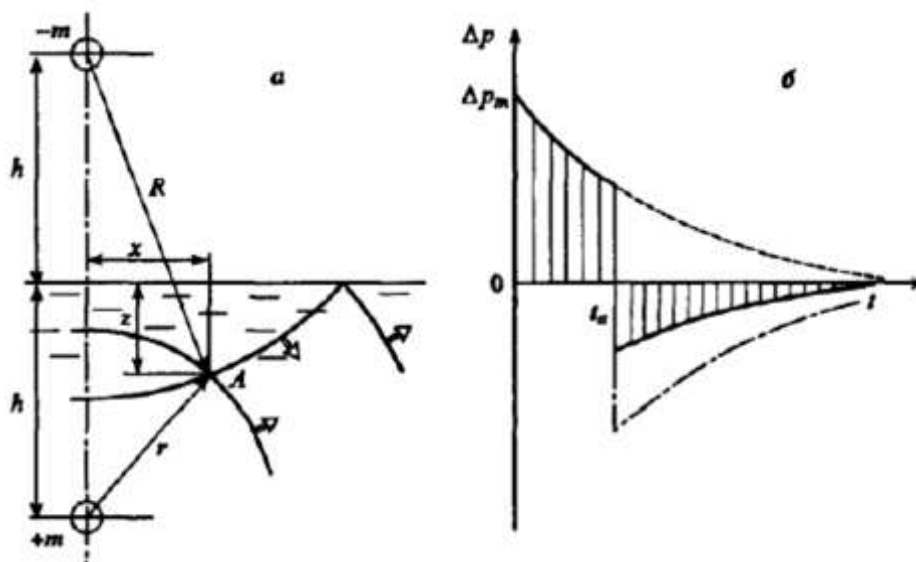
където:

$$R = \sqrt{x^2 + (h + z)^2}.$$

Времето на действие на положителната фаза на свърх налягането се определя от разликата на времето за пристигане в дадена точка на правата и на отразената от свободната повърхност вълна:

$$t_a = \frac{R - r}{c_0} = \frac{r}{c_0} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{hz}{r^2}} - 1 \right). \quad (21.3)$$

На фигура 21.1.б за вълната на експоненциалния профил (21.1) са построени диаграмите на свръх налягането в правата (чрез пунктир) и отразената (чрез штрих-пунктир) вълни и сумарната диаграма (защрихованата) за точка А на фигура 21.1.а. Формално следствие на (21.2) е възможността за възникване на отрицателното налягане в течността (протакато се напрежение). Според данните в литературата свободната от механични примеси вода при определени условия издържа на отрицателно налягане до 60 МРа. И все пак на практика най-често се наблюдава бързо развитие на кавитационни явления и спадане на налягането до налягането на вакуум.



Фигура 21.1. Схема на подреждане на източника и оттичането за отчитане влиянието на свободната повърхност (а) и диаграмата на свръх налягането в разглежданата точка А (б).

Отражението на ударните вълни от свободната повърхност се фиксира с голяма точност чрез експерименталните методи. Моментът на достигане до точката на отразената вълна на разреждане отговаря на отреза на кривата на налягането на осцилограмата на взрива и все пак отрицателни налягания при експериментите не се регистрират. Поради това на диаграмите на наляганията, построени с помощта на (21.2), областта на отрицателните налягания се занулява, а отделеният импулс и плътността на потока на енергията във вълната се изчисляват според зависимостите (17.12) и (17.17) чрез полагане на $t = t_a$ от (21.3).

Изложената схема за отчитане на влиянието на свободната повърхност с акустично приближение се отличава със своята простота и нагледност и все пак има ограничена област на приложение. Ако полето на налягане се разглежда в близост до свободната повърхност на разстояния от епичентъра, които значително надвишават дълбочината на взрива, то е необходимо да взимаме предвид нелинейността на процеса на отражение, свързана с разликата в скоростите на разпространение на елементарните вълни на понижаване на налягането (характеристиките). В този случай характеристиките на малките амплитуди, които се разпространяват с местната скорост на звука, при определени условия могат да догонят фронта на УВ и да го отслабят. Обратно, групата характеристики, която притежава значителна отрицателна амплитуда и която се разпространява с по-малка скорост, ще изостава от фронта. По такъв начин, нелинейното влияние на свободната повърхност може да се прояви както в изопачаването на цялата диаграма налягане-време с увеличаване на общата

продължителност на положителната фаза на свръх налягането, така и с намаляване на амплитудата на правата вълна.

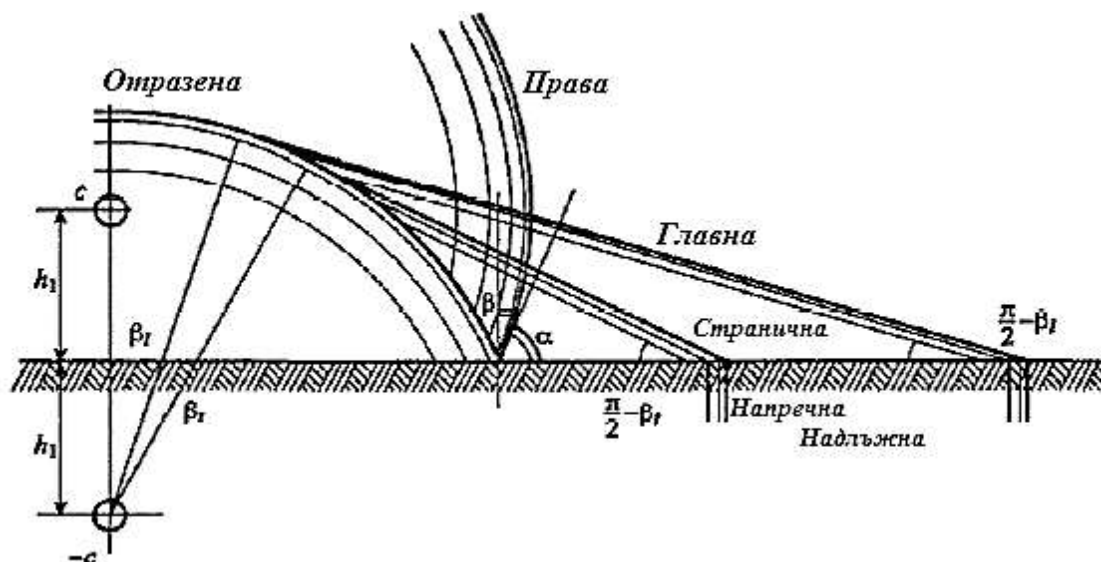
Цялата област от полу-пространството, която е заета от вода, може да се раздели на три зони.

В зона I при $x < x_a$ за оценка на влиянието на свободната повърхност можем с голяма точност да използваме описаното линейно приближение. В зона II при $x_a < x < x_c$ се извършва съществено изопачаване на диаграмата на налягането във вълната, която може с приближение да бъде описана от зависимостта:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_m \left(1 - \left(\frac{t}{t_c} \right)^n \right), \\ n &= \frac{\varphi}{1 - \varphi}; \\ \varphi &= \frac{\theta}{t_c} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{t_c}{\theta} \right\} \right); \\ t_c &= b t_a; \end{aligned} \quad (21.4)$$

2. Отражение на ударната вълна от дъното на водоема

Изучаването на влиянието на дъното на водоема върху полето на налягане при подводен взрив е свързано с трудности от принципен характер. Преди всичко е необходима стойността на механичните свойства на грундовете на дъното. Сведенията от такъв род са доста ограничени, но те също така свидетелстват за широкия диапазон на акустичната твърдост на грундовете (от 0,1 до 4,8 от акустичната твърдост на водата), което предопределя многообразния характер на отражението. В редица случаи е необходимо да вземем под внимание нееднородността на грундовете и тяхната слоеста структура. Голямо значение има релефът на дъното, чието отчитане не се поддава на математическа оценка.



Фигура 21.2. Отражение на ударната вълна от дъното на водоема.

За извършване на анализ с приближение като правило се полага повърхността на дъното да е равна на плоската граница на разделната линия между две среди, а грундът се разглежда като изотропно еластично полу-пространство. Ако взривът на съсредоточения заряд се извършва на разстояние h_1 от дъното (фиг. 21.2), то в даден момент падащата (правата) вълна достига дъното на водоема и възниква отразена вълна,

чиято обща точка се премества по цялата повърхност на дъното със скорост $c_0/\cos\beta$, където ъгълът на падане е:

$$\beta = \arccos \frac{\sqrt{r^2 - h_1^2}}{r + 2h_1}. \quad (21.5)$$

Както е известно, в безграничните изотропни тела могат да се разпространяват надлъжни и напречни вълни. Първите от тях възникват в резултат на обемната деформация, а вторите – в резултат на деформацията на преместването.

В началото на отражението, когато скоростта на преместване на общата точка, поради голямата стойност на ъгъл β (21.5) е по-голяма от скоростта на разпространение на надлъжните c_i и напречните c_t вълни, в течността се разпространяват само правата и отразената вълна. Отражението ще бъде редовно. При определена стойност на ъгъла $\beta = \beta_i$ скоростта на преместване на общата точка става равна на скоростта на разпространение на надлъжните вълни. Съответстващият на това условие ъгъл се нарича ъгъл на цялото вътрешно отражение на надлъжните вълни $\beta_t = \arccos(c_0/c_i)$. При $\beta < \beta_i$ произтича т. нар. първо нередовно отражение: надлъжните смущения в грунда задминават ударната вълна и създават допълнителна главна вълна.

При по-нататъшното разпространение на правата вълна скоростта на преместване на общата точка по повърхността на грунда при някаква стойност на ъгъла $\beta = \beta_t$ става равна на скоростта на разпространение на напречните вълни. Ъгълът $\beta_t = \arccos(c_0/c_t)$ се нарича ъгъл на цялото вътрешно отражение на напречните вълни. Когато ъгълът β става по-малък от β_t , започва второто нередовно отражение: напречната вълна задминава правата, вследствие на което във водата се появява и странична вълна.

Освен тези вълни, показани на фигура 21.2, при взрива във водата възникват още дънна вълна и „предвестник“. Дънната вълна се нарича вълна в течността, която поражда повърхностната вълна на Релей в грунда на дъното. Амплитудата на вълната на Релей намалява с дълбочината по силата на експоненциалния закон, поради което тя се разпространява по закон, близък до закона за цилиндричната вълна, и с разстоянието намалява по-бавно. „Предвестникът“ е областта на плавното нарастване на налягането пред фронта на правата вълна, която възниква в резултат на наслагането на смущенията, които са създадени от надлъжните и напречните вълни. Съпоставянето на амплитудите на правата и отразената вълна, от една страна, и вълните със сеизмичен произход, от друга страна, дават възможност да направим заключението, че при практическите пресмятания вълната със сеизмичен произход като правило може да не бъде отчитана, тъй като натоварването във фиксираната точка на пространството преимуществено се образува от натоварванията, които се създават от падащите и отразените вълни.

Най-голям практически интерес представлява отразената вълна. За нейното описание в редица случаи е достатъчно решението на задачата с линейна постановка и акустично приближение за твърдостта и дъното във вид на гъвкаво полу-пространство. Анализът на задачата в такава постановка е извършен от Е. И. Шемякин. Налягането в отразената вълна при взрив на съсредоточения заряд може да бъде намерено по формулата:

$$\frac{\Delta p_{rf}}{p_0} = K_{rf}(\beta) \Delta p_{m\infty} \sqrt{r^2 + 4h_1 z_1} \exp\left\{-\frac{t - t_{rf}}{\theta}\right\}, \quad (21.6)$$

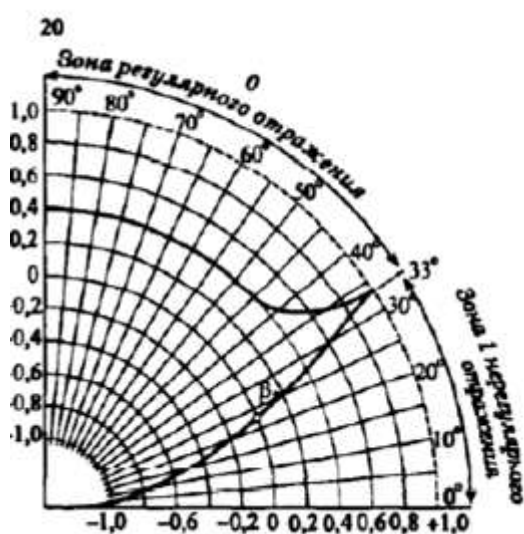
където t е времето, пресмятано от момента на пристигане в разглежданата точка на падащата вълна;

$t_{rf} = (\sqrt{r^2 + 4h_1 z_1} - r)/c_0$ е времето на задържане на пристигане на отразената вълна;

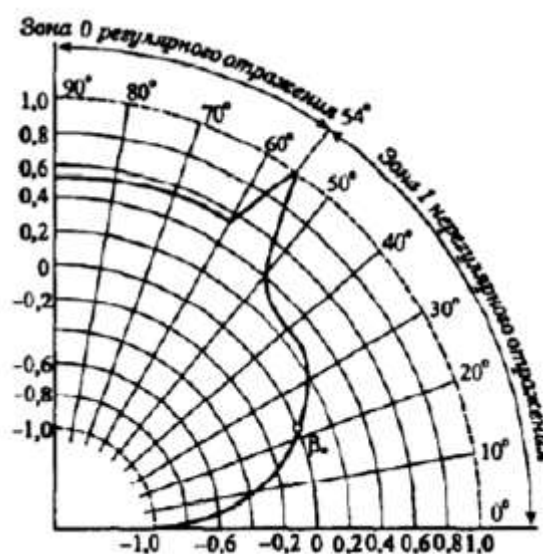
$\beta = \arctg\left(\frac{(h_1 - z_1)}{\sqrt{r^2 - (h_1 - z_1)^2}}\right)$ е ъгълът на падане на правата вълна на повърхността на грунда;

$\Delta p_{m\infty} \sqrt{r^2 + 4h_1 z_1}$ е свръх налягането на фронта на преминаващата вълна в безграничната течност на разстояние $\sqrt{r^2 + 4h_1 z_1}$, равно на отдалечеността от мнимия източник в грунда на дъното.

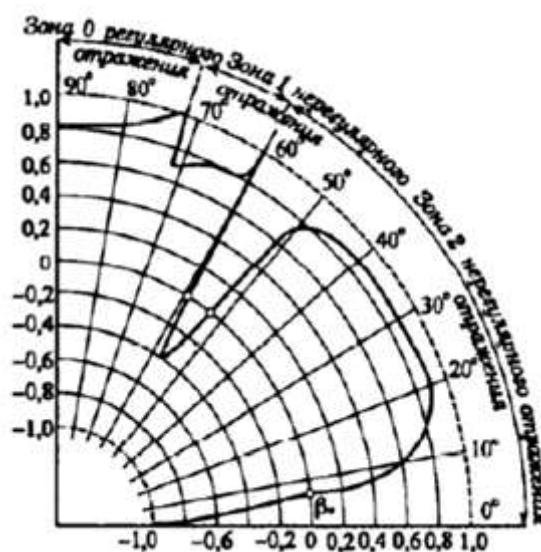
Коефициентът $K_{rf}(\beta)$ зависи само от акустичните свойства на грунда и ъгъла на падане. Това дава възможност за най-типичните грудове да построим окончателно ъгловите диаграми $K_{rf}(\beta)$, които са удобни за извършване на практическите пресмятания. На фигури 21.3÷21.5 са дадени ъгловите диаграми за пясъчливото, глинестото и скалистото дъно. На фигурите са отбелязани зоните: 0 – редовно; 1 – първо и 2 – второ нередовно отражение.



Фигура 21.3. Диаграма за определяне на коефициента на отражение (пясъчливо дъно).



Фигура 21.4. Диаграма за определяне на коефициента на отражение (глинесто дъно).



Фигура 21.5. Диаграма за определяне на коефициента на отражение (дъно-скала).

Както следва от условията на диаграмата, за всеки вид грунд има съществено значение ъгълът на падане $\beta = \beta_*$, при което коефициентът на отражение е равен на нула. При ъглите със стойности $\beta < \beta_*$ коефициентът на отражение става отрицателен и при отражение от дъното възникват вълни на разреждане. Това се обяснява с факта, че в дадения диапазон ъглите на свръх налягането в правата вълна водят след себе си движение на грунда под границата на раздела със скорости, които надминават нормалните (спрямо тази граница), които представляват скоростите на движение на частиците в правата вълна. Експериментите показват, че възникващите при отражение от дъното на вълната разреждания имат по-малки амплитуди и продължителност в сравнение с вълните на разреждане, които възникват при отражение от свободната повърхност. След тях възниква вторично налягане. Поради това отчитането на явлениято е съществено само при извършване на оценка на налягането на фронта на отразената вълна и в неговата близка околност.

При определени условия нелинейните ефекти на отражението водят до промяна на налягането на фронта на падащата УВ. Ако коефициентите (16.31):

$$K_{gr} = \begin{cases} \frac{3,14 \left(\frac{h_1}{r_0}\right)^{2,3} \left(1 + 4,2 \frac{z_1}{h_1}\right)}{\frac{\sqrt{r^2 + (h_1 - z_1)^2}}{r_0}}, & \text{при } \frac{h_1}{r_0} \geq \left(\frac{3,23}{\text{tg}\beta_*}\right)^{0,77}, \\ \left(1 + \frac{\frac{h_1}{r_0}}{2 \left(\frac{h_1}{r_0 \text{tg}\beta_*}\right)^{0,435} - \frac{h_1}{r_0}}\right) h_1, & \text{при } \frac{h_1}{r_0} < \left(\frac{3,23}{\text{tg}\beta_*}\right)^{0,77}, \\ \frac{\text{tg}\beta_* \sqrt{r^2 + (h_1 - z_1)^2}}{\text{tg}\beta_* \sqrt{r^2 + (h_1 - z_1)^2}}, & \end{cases} \quad (21.7)$$

са по-малки от единица, то налягането на фронта на правата вълна отслабва и може да бъде определено по формулата:

$$\frac{\Delta p_m}{p_0} = \Delta p_{m\infty} \sqrt[3]{K_{gr}}. \quad (21.8)$$

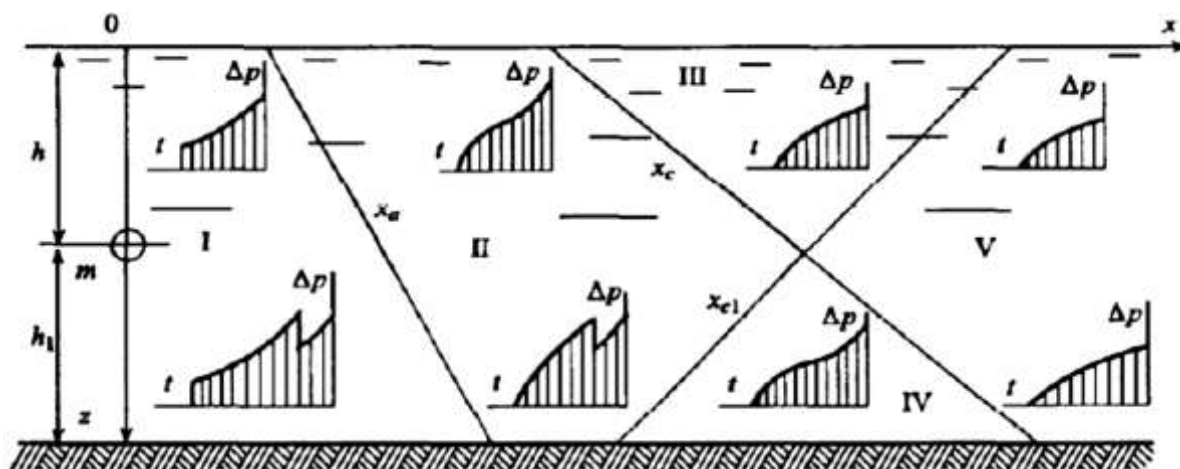
3. Поле на налягането при взрив на плитки водоеми

При взрив в плитки водоеми смущенията, които възникват във водата се разпространяват в тънкия слой между свободната повърхност и дъното на водоема. В резултат на отражението на разгледаните по-горе вълни от границата на слоя на водата и многократното им взаимодействие една с друга възниква сложна система от вълни, чието количество с течение на времето бързо нараства, а интензивността намалява. Това налага при разглеждане на взрива в недълбоките водоеми да взимаме предвид съвместното влияние на свободната повърхност и дъното на водоема. Нелинейното взаимодействие на тези системи в общата постановка на задачата води до непреодолими трудности. И все пак, както показва опитът, е достатъчно да се ограничим до изучаването на първите отражения.

Ако не взимаме предвид вълните със сеизмичен произход, то при отражение на ударната вълна от свободната повърхност и високоскоростното $c_i > c_t > c_0$ скалисто дъно при условие $h_1/r_0 < (3,23/\text{tg}\beta_*)^{0,77}$ можем да посочим пет характерни зони (фиг. 21.6).

Границата на зона I се определя от положението на свободната повърхност, където влиянието на отразените вълни може да се оцени с акустично (линейно) приближение. В зона II влияние оказват нелинейните ефекти на отражението от двете

гранични повърхности, в резултат на което диаграмата на налягането в опашката се изопачава. И все пак в зона II, както и в зона I, параметрите на фронта на правата УВ не претърпяват намаляване и се пресмятат по същия начин, по който се пресмятат и в безграничната среда.



Фигура 21.6. Зони на влияние на свободната повърхност и дъното на водоема върху действието на взрива във водата (дъното на водоема е скала).

В зоните III, IV и V влиянието на граничните повърхности се разпространява по цялата диаграма на налягането, включително и налягането на фронта на правата вълна. В този случай в зона III се проявява влиянието на преимуществено свободната повърхност, а в зона IV – дъното на водоема, поради което налягането на фронта в зона IV може да се пресметне по формула (21.8). В зона V фронтът на УВ отслабва поради вълновите разреждания, които идват от двете граници, и налягането върху него се пресмята по формулата:

$$\frac{\Delta p_m}{p_0} = \Delta p_{m\infty} \sqrt[3]{K_{gr} K_c}, \quad (21.9)$$

която отчита и двете влияния.

Върху другите характеристики на ударната вълна в зоните I, II и III преобладаващо влияние оказва свободната повърхност, поради което за тях диаграмата на налягането, продължителността на действието, отделеният импулс и плътността на потока на енергията могат да се намерят. В зоните IV и V върху параметрите на вълната оказва влияние свободната повърхност и дъното на водоема. В тези зони продължителността на действие на фазата на свиване може да бъде оценена според формулата:

$$t_+ = b \sqrt{K_{gr} t_a}, \quad (21.10)$$

където b се определя по (21.4); K_{gr} – по (21.7), а t_a – по (21.3).

Формата на диаграмата на налягане в случая на съвместното влияние на свободната повърхност и дъното на водоема се различават в незначителна степен от аналогичната крива, която се получава в резултат на влиянието единствено на свободната повърхност. Поради това свръх налягането като времева функция за тези зони може с приближение да бъде описано от зависимостта, сходна с (21.4):

$$\Delta p = \Delta p_m \left(1 - \left(\frac{t}{t_+} \right)^n \right), \quad (21.11)$$

където показателят n може да бъде с приближение равен на $n = 1,5$.

Изложената схема не взема предвид образуването в течността на област на кавитация и, както показват пресмятанията, важи в онзи случай, в който дълбочината на

акваторията не е прекалено малка (не по-малко от 4 радиуса на заряда). При по-малки дълбочини използваният квази-линеен метод за оценка на хидродинамичното поле става неприложим.

При $h_1/r_0 > (3,23/\text{tg}\beta_*)^{0,77}$ зоната на отрицателното отражение от дъното на водоема не съвпада със зоните IV и V и няма да обхваща част от зоните II и III. Вследствие на това се появяват още допълнителни характерни зони. По такъв начин, разглежданият случай за високоскоростното скално дъно е макар и не най-разпространеният, но все пак чест случай.

За обичайния нискоскоростен грунд на дъното на водоема (песъчлива глинеста почва), когато $c_0 > c_i > c_t$ (фиг. 21.7) в първите две зони се наблюдава редовно отражение на ударната вълна от свободната повърхност и дъното на водоема, а в останалите – нередовно отражение. Налягането на фронта на вълните в I и II зони е същото, както и в безграничната течност, в зоните III, IV и V то претърпява отслабване съответно по формулите (21.8) и (21.9). Продължителността на действие на фазата на свиване е равна на най-малката стойност, пресметната по формулите:

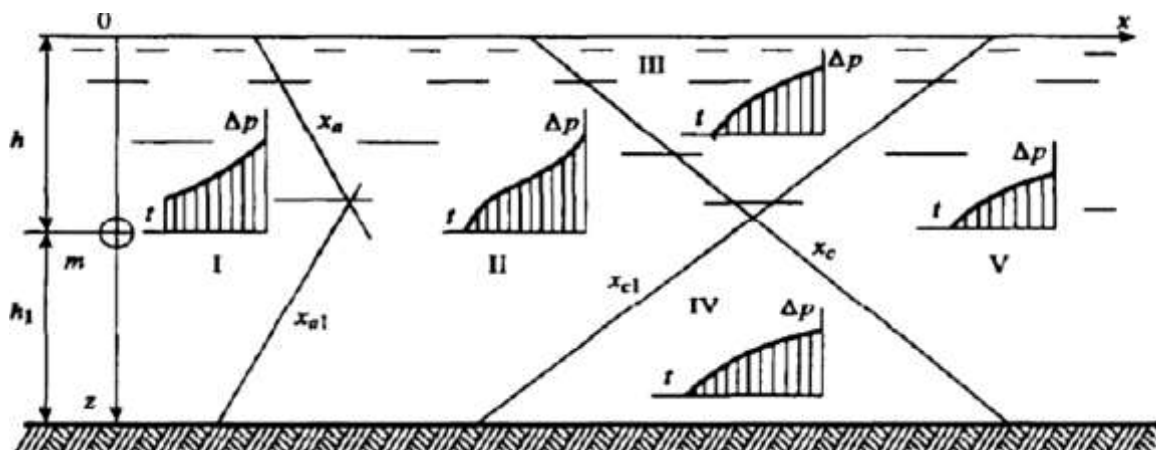
$$t_+ = \begin{cases} t_{+c} \\ t_{+gr} \end{cases}, \quad (21.12)$$

където:

$$t_{+c} = \begin{cases} t_a & \text{при } x < x_a \\ bt_a & \text{при } x_a < x < x_c; \\ b^6 \sqrt{K_{gr}} t_a & \text{при } x > x_c \end{cases}$$

$$t_{+gr} = \begin{cases} t_{a1} & \text{при } x_1 < x_{a1} \\ b_1 t_{a1} & \text{при } x_{a1} < x < x_{c1} \\ b_1^6 \sqrt{K_c} t_{a1} & \text{при } x_1 > x_{c1} \end{cases}$$

В тези формули t_a и b се определят по (21.3) и от (21.4), а t_{a1} и b_1 от същите формули със замяна в тях на h и z с h_1 и z_1 .



Фигура 21.7. Зони на влияние на свободната повърхност и дъното на водоема върху действието на взрива във водата (дъното на водоема е песъчлива глинеста почва).

Останалите оценки с оглед на дадените съотношения могат да бъдат дадени с приближение с помощта на съответните зависимости.