

Прогнозирование последствий взрывов конденсированных взрывчатых веществ

1.1. Общие сведения

Взрыв – это процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объёме за короткий промежуток времени. В результате взрыва вещество, заполняющее объём, в котором происходит освобождение энергии, превращается в сильно нагретый газ с очень высоким давлением. Этот газ воздействует на окружающую среду, вызывая её движение. Взрыв в твёрдой среде сопровождается её разрушением и дроблением. Основное отличие между пожарами и взрывами состоит в скорости выброса энергии. Во время пожара энергия освобождается медленно, при взрыве освобождение энергии происходит в течении микросекунд.

Различают два типа взрывов: физические взрывы и химические. При физическом взрыве высвобождающаяся энергия является внутренней энергией сжиженного газа. При химических взрывах энерговыделение обусловлено экзотермической реакцией между горючим и окислителем.

Порожденное взрывом движение, при котором происходит резкое повышение давления, плотности и температуры среды, называют взрывной волной. Фронт взрывной волны распространяется по среде с большой скоростью, в результате чего область, охваченная движением, быстро расширяется. Возникновение взрывной волны является характерным следствием взрыва в различных средах. Если среда отсутствует, т. е. взрыв происходит в вакууме, энергия переходит в кинетическую энергию разлетающихся во все стороны с большой скоростью продуктов взрыва. Посредством взрывной волны взрыв производит механическое воздействие на объекты, расположенные на различных расстояниях от него. По мере удаления от места взрыва механическое воздействие взрывной волны ослабевает.

Разнообразные виды взрывов различаются физической природой источника энергии и способом её освобождения.



1.1.1. Химические взрывы

Типичными примерами взрывов являются взрывы химических взрывчатых веществ. Взрывчатые вещества обладают способностью к быстрому химическому разложению, при котором энергия межмолекулярных связей выделяется в виде теплоты. Для взрывчатых веществ характерно увеличение скорости химического разложения при повышении температуры. При сравнительно низкой температуре химическое разложение протекает очень медленно, так что взрывчатое вещество в течение длительного времени может не претерпевать заметного изменения в своём состоянии. В этом случае между взрывчатым веществом и окружающей средой устанавливается тепловое равновесие, при котором непрерывно выделяющиеся небольшие количества теплоты отводятся за пределы вещества посредством теплопроводности. Если создаются условия, при которых выделяющаяся

теплота не успевает отводиться за пределы взрывчатого вещества, то благодаря повышению температуры развивается самоускоряющийся процесс химического разложения, который называется тепловым взрывом. В связи с тем, что теплота отводится через внешнюю поверхность взрывчатого вещества, а её выделение происходит во всём объёме вещества, тепловое равновесие может быть также нарушено при увеличении общей массы взрывчатого вещества. Это обстоятельство учитывается при хранении взрывчатых веществ.

Возможен иной процесс осуществления взрыва, при котором химическое превращение распространяется по взрывчатому веществу последовательно от слоя к слою в виде волны. Движущийся с большой скоростью передний фронт такой волны представляет собой ударную волну, то есть резкий (скачкообразный) переход вещества из исходного состояния в состояние с высокими давлением и температурой. Взрывчатое вещество, сжатое ударной волной, оказывается в состоянии, при котором химическое разложение протекает очень быстро. В результате область, в которой освобождается энергия, оказывается сосредоточенной в тонком слое, прилегающем к поверхности ударной волны. Выделение энергии обеспечивает сохранение высокого давления в ударной волне на постоянном уровне. Процесс химического превращения взрывчатого вещества, который вводится ударной волной и сопровождается быстрым выделением энергии, называется детонацией. Детонационные волны распространяются по взрывчатому веществу с большой скоростью, всегда превышающей скорость звука в исходном веществе. Например, скорости волн детонации в твёрдых взрывчатых веществах составляют несколько км/сек. Тонна твёрдого взрывчатого вещества может превратиться таким способом в плотный газ с высоким давлением за 10^{-4} сек. Давление в образующихся при этом газах достигает нескольких сотен тысяч атмосфер.

Взрывчатые вещества

Взрывчатые вещества (ВВ) – это химические соединения или смеси веществ, способные к быстрой химической реакции, сопровождающейся выделением большого количества тепла и образованием газов. Эта реакция, возникнув в какой-либо точке в результате нагревания, удара, трения, взрыва другого взрывчатого вещества или иного внешнего воздействия, распространяется по заряду за счёт передачи энергии от слоя к слою с помощью процессов тепло- и массопереноса (горение) либо ударной волны (детонация).

Скорость горения различных взрывчатых веществ колеблется от долей мм/с до десятков и сотен м/сек, скорость детонации может превышать 9 км/с.

Взрывчатыми веществами могут быть конденсированные (твёрдые и жидкие) вещества, газы, а также взвеси частиц твёрдых или жидких веществ в газах. По заряду из 1 кг гексогена, объём которого 0,6 л, а теплота взрыва 5,4 Мдж (1300 ккал), детонация может пройти за 10 мксек (10^{-5} сек), что соответствует мощности 500 млн. кВт (в десятки раз больше, чем мощность самой крупной электростанции). Реакция при детонации идёт так быстро, что газообразные продукты с температурой несколько тысяч градусов оказываются сжатыми в объёме, близком к исходному объёму заряда, до давлений в десятки Гн/м². Давление, развивающееся при детонации, зависит от плотности заряда и скорости детонации.

Важной характеристикой ВВ является также их детонационная способность, мерой которой служит критический диаметр детонации, т. е. наименьший диаметр цилиндрического заряда, при котором детонация ещё распространяется, несмотря на разброс вещества из зоны реакции. Детонационная способность ВВ тем больше, чем меньше критический диаметр.

Из многих способных к взрыву соединений в качестве взрывчатых веществ и компонентов взрывчатых смесей применяют лишь 2—3 десятка веществ. Основные из них — нитросоединения (тринитротолуол, тетрил, гексоген, октоген, нитроглицерин, тетранитропентаэритрит — тэн, нитроклетчатка, нитрометан и др.) и соли азотной кислоты, особенно нитрат аммония. Для уменьшения чувствительности и опасности в обращении мощные взрывчатые вещества смешивают с парафином, церезином и другими легкоплавкими добавками (этот процесс называется флегматизация). Для увеличения теплоты взрыва в смеси вводят порошкообразный алюминий или магний.

По взрывчатым свойствам (условиям перехода горения в детонацию) и обусловленным ими областям применения взрывчатые вещества подразделяют на:

- инициирующие (первичные);
- бризантные (вторичные);
- метательные (пороха).

Иницирующие вещества характеризуются чрезвычайно высокой скоростью взрывного превращения. Чувствительность их высока, горение неустойчиво и быстро переходит в детонацию уже при атмосферном давлении. Взрыв может быть возбуждён поджиганием, ударом или трением. Они используют для возбуждения взрывчатого превращения других веществ. Основные представители этих веществ — азид свинца, гремучая ртуть, тринитрорезорцинат свинца, тетразен. Бризантные взрывчатые вещества более инертны. Чувствительность их к внешним воздействиям гораздо меньше, чем инициирующих. Горение может перейти в детонацию только при наличии прочной оболочки либо большого количества этого вещества. В качестве бризантных взрывчатых веществ применяют главным образом нитросоединения и взрывчатые смеси на основе нитратов, хлоратов, перхлоратов и жидкого кислорода. Основным режим их взрывного превращения — детонация, возбуждаемая небольшим зарядом инициирующего взрывчатого вещества. Метательные взрывчатые вещества горят ещё более устойчиво, чем бризантные: они не детонируют при горении даже в самых жёстких условиях. Основным режим взрывного превращения таких веществ — горение. Отличие метательных веществ от бризантных определяется в основном не химическим составом, а физической структурой этих веществ (плотностью и прочностью заряда).

1.1.2. Ядерные взрывы (При первоначальном ознакомлении можно опустить !)

При ядерном взрыве происходит превращение атомных ядер исходного вещества в ядра других элементов, которое сопровождается освобождением энергии связи элементарных частиц (протонов и нейтронов), входящих в состав атомного ядра. Ядерный взрыв основан на способности определённых изотопов тяжёлых элементов урана или плутония к делению, при котором ядра исходного вещества распадаются, образуя ядра более лёгких элементов. При делении всех ядер, содержащихся в 50 г урана или плутония, освобождается такое же количество энергии, как и при детонации 1000 т тринитротолуола. Деление ядра атома урана или плутония может произойти в результате захвата ядром одного нейтрона. Существенно, что в результате деления возникает несколько новых нейтронов, каждый из которых может вызвать деление других ядер. В результате число делений будет быстро нарастать (по закону геометрической прогрессии). Если принять, что при каждом акте деления число нейтронов, способных вызвать деление др. ядер, удваивается, то менее чем за 90 актов деления образуется такое количество нейтронов, которого достаточно для деления ядер, содержащихся в 100 кг урана или плутония. Время, необходимое для деления этого количества вещества, составит $\sim 10^{-6}$ сек. Такой самоускоряющийся процесс называется цепной реакцией. В действительности не все нейтроны, образующиеся при делении, вызывают деление других ядер. Если общее количество делящегося вещества мало, то большая часть нейтронов будет выходить за пределы вещества, не вызывая деления. В делящемся веществе всегда имеется небольшое количество свободных нейтронов, однако, цепная реакция развивается лишь в том случае, когда число вновь образующихся нейтронов будет превышать число нейтронов, которые не производят деления. Такие условия создаются, когда масса делящегося вещества превосходит так называемую критическую массу. Взрыв происходит при быстром соединении отдельных частей делящегося вещества (масса каждой части меньше критической) в одно целое с общей массой, превосходящей критическую массу, или при сильном сжатии, уменьшающем площадь поверхности вещества и тем самым уменьшающем количество выходящих наружу нейтронов. Для создания таких условий обычно используют взрыв химического взрывчатого вещества.

Существует другой тип ядерной реакции — реакция синтеза лёгких ядер, сопровождающаяся выделением большого количества энергии. Силы отталкивания одноимённых электрических зарядов (все ядра имеют положительный электрический заряд) препятствуют протеканию реакции синтеза, поэтому для эффективного ядерного превращения такого типа ядра должны обладать высокой энергией. Такие условия могут быть созданы нагреванием веществ до очень высокой температуры. В связи с этим процесс синтеза, протекающий при высокой температуре, называют термоядерной реакцией. При синтезе ядер дейтерия (изотопа водорода 2H) освобождается почти в 3 раза больше

энергии, чем при делении такой же массы урана. Необходимая для синтеза температура достигается при ядерном взрыве урана или плутония. Таким образом, если поместить в одном и том же устройстве делящееся вещество и изотопы водорода, то может быть осуществлена реакция синтеза, результатом которой будет взрыв огромной силы. Помимо мощной взрывной волны, ядерный взрыв сопровождается интенсивным испусканием света и проникающей радиации.

1.1.3. Физические взрывы (При первоначальном ознакомлении можно опустить !)

Существуют взрывы, в которых выделяющаяся энергия подводится от внешнего источника. Таким примером может служить мощный электрический разряд в какой-либо среде. Электрическая энергия в разрядном промежутке выделяется в виде теплоты, превращая среду в ионизованный газ с высокими давлением и температурой. Аналогичное явление происходит при протекании мощного электрического тока по металлическому проводнику, если сила тока оказывается достаточной для быстрого превращения металлического проводника в пар. Явление взрыва возникает также при воздействии на вещество сфокусированного лазерного излучения. Как один из видов взрыва можно рассматривать процесс быстрого освобождения энергии, происходящий в результате внезапного разрушения оболочки, удерживавшей газ с высоким давлением (например, взрыв баллона со сжатым газом). Взрыв может произойти при столкновении твёрдых тел, движущихся навстречу друг другу с большой скоростью. При столкновении кинетическая энергия тел переходит в теплоту в результате распространения по веществу мощной ударной волны, возникающей в момент столкновения. Скорости относительного сближения твёрдых тел, необходимые для того, чтобы в результате столкновения вещество полностью превратилось в пар, измеряются десятками км/сек, развивающиеся при этом давления составляют миллионы атмосфер.

1.1.4. Вопросы для проверки

1. Что называется взрывом и каковы его характерные признаки?
2. На какие виды делятся взрывы по своей природе?
3. Дайте определение взрывчатым веществам.
4. Какую роль выполняют первичные и вторичные иницирующие взрывчатые вещества?
5. Как называются компоненты, которые вводятся в состав взрывчатых веществ для повышения его чувствительности к начальному импульсу и передачи детонации?
6. Что такое флегматизация?

1.2. Взрывы конденсированных взрывчатых веществ

1.2.1. Математическая модель точечного взрыва (При первоначальном ознакомлении данный раздел можно опустить !)

Для математического описания процесса распространения ударной волны в атмосфере при взрыве используется модель точечного взрыва. Взрыв происходит на плоской поверхности раздела между газом (воздухом) и деформируемой средой. Воздушная среда приближается моделью невязкого, нетеплопроводного газа с показателем адиабаты γ . Ударная волна распространяется в полуограниченном пространстве с начальной плотностью ρ_0 и давлением P_0 при наличии противодействия.

Данная модель предполагает, что выделение энергии при взрыве происходит за короткий промежуток времени в относительно небольшой области пространства. Таким образом, возникает идеализированное представление о мгновенном точечном взрыве как о движении газа, которое вызвано мгновенным выделением конечной энергии в некоторой точке.

При воздушном взрыве ударная сферическая волна достигает земной поверхности и отражается от неё. На некотором расстоянии от эпицентра взрыва фронт отраженной волны сливается с фронтом падающей, вследствие чего образуется так называемая головная волна с вертикальным фронтом, распространяющаяся от эпицентра вдоль земной поверхности. Ближняя зона, где отсутствует слияние фронтов, называется зоной регулярного отражения, а дальняя зона, в которой распространяется головная волна, - зоной нерегулярного отражения. В ближней зоне при умеренной высоте взрыва давление в ударной волне очень велико, но размеры зоны порядка высоты, на которой произошел взрыв.

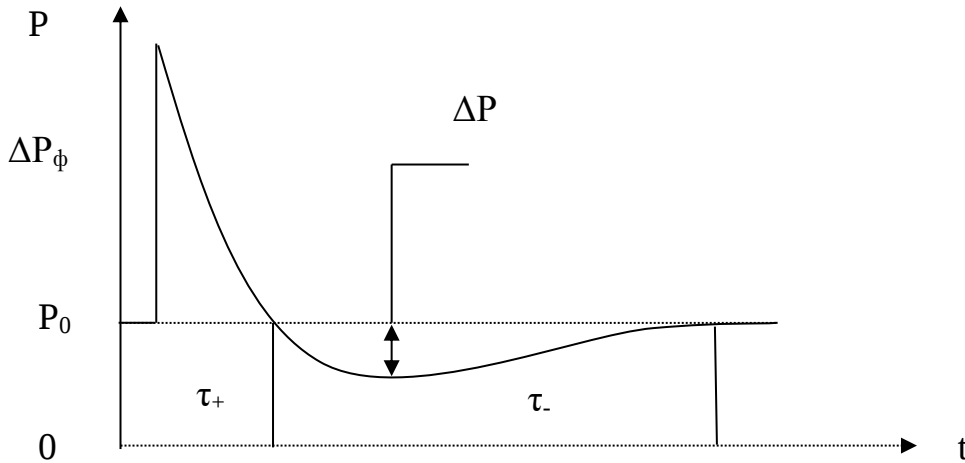


Рис.3.1. Изменение давления в ударной волне P со временем t в фиксированной точке.

Математическая модель неустановившегося одномерного движения газа в переменных Эйлера формулируется в сферической системе координат[1]. Модель включает уравнение сохранения импульса, уравнение неразрывности, уравнение сохранения энергии.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\rho u}{r} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} + \gamma p \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\gamma p u}{r} = 0.$$

Здесь безразмерные переменные t , r , ρ , p , u связаны с размерными переменными, обозначенными штрихом, следующими соотношениями

$$t = \frac{t'}{t_0} \alpha_0^{1/3}, \quad r = \frac{r'}{r_0} \alpha_0^{1/3}, \quad \rho = \frac{\rho'}{\rho_1}, \quad p = \frac{p'}{p_1}, \quad u = \frac{u'}{c_1} \sqrt{\gamma},$$

где t' – время, r' – радиальная переменная, ρ' – плотность, p' – давление, u' – компонента вектора скорости в радиальном направлении, $r^0 = (E_0/p_1)^{1/3}$ – динамическая длина, $t^0 = r^0 (\rho_1/p_1)^{1/2}$ – динамическое время, $\alpha_0 = 0.851$, $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты, E_0 – энергия, выделяющаяся при взрыве, p_1 , ρ_1 и c_1 – давление, плотность и скорость звука невозмущенного газа.

Система уравнений математической модели дополняется условием адиабатичности течения и краевыми условиями. Граничное условие в центре ($r=0$) имеет вид $u=0$. Граничное условие на фронте ударной волны ($r=\varphi(t)$):

$$p = \frac{1}{4} \left[(\gamma+1)u^2 + u\sqrt{(\gamma+1)^2 u^2 + 16\gamma} \right],$$

$$\rho = \frac{(\gamma+1)p + (\gamma-1)}{(\gamma+1) + (\gamma-1)p},$$

$$D = \left[\frac{(\gamma+1)p + (\gamma-1)}{2} \right]^{1/2},$$

где D – скорость ударной волны.

Для решения уравнений используется метод конечных разностей, который удовлетворительно описывает процесс неустановившегося одномерного движения газа, за исключением начальных стадий взрыва. Поэтому для определения характеристик движения газа на начальной стадии взрыва используется линеаризованное решение. При больших временах используются асимптотические законы затухания ударных волн.

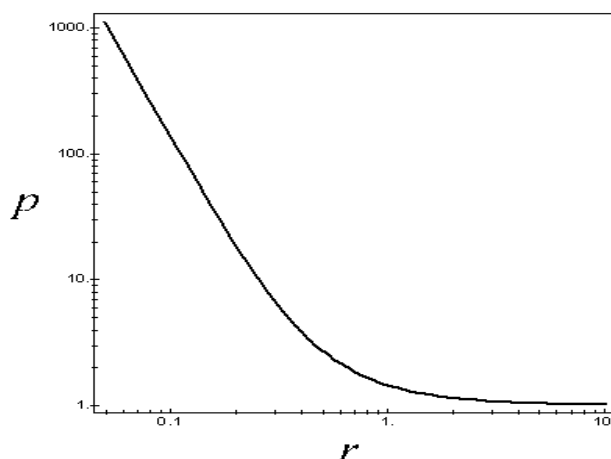


Рис.3.2. Зависимость безразмерного давления на фронте ударной волны p от безразмерного расстояния r при точечном взрыве

В результате решения приходим к пространственно временным газодинамическим функциям точечного взрыва, которые характеризуют распространение ударной волны в атмосфере. В частности, находим функцию избыточного давления на фронте ударной волны в зависимости от расстояния от места взрыва. Результаты численного решения данной задачи представлены в литературе. Например, в работе [2]. На рис. 3.2 изображена зависимость безразмерного давления на фронте ударной волны от безразмерного расстояния r при точечном взрыве. По известным значениям энергии взрыва и атмосферному давлению определяется безразмерное давление и безразмерный радиус для заданных условий. Для конкретных условий взрыва можно выполнить переход в размерные единицы. Например, если масса взрывчатого вещества 49 тонн, тротильный эквивалент 1.2, то зависимость избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния от места взрыва отвечает данным таблицы 3.1.

Таблица 3.1

**Избыточное давление на фронте ударной волны при взрыве
(масса ВВ – 49 тонн, тротилловый эквивалент 1.2)**

Положение фронта ударной волны от точки взрыва, м	Избыточное давление на фронте ударной волны	
	кПа	кг/см ²
30	3906,2	39,8
40	1794,2	18,3
50	1000,1	10,2
100	188,3	1,9
200	47,07	0,48
300	23,97	0,24
400	15,63	0,16
500	11,48	0,12
1000	4,846	0,049
1500	3,056	0,031
2000	2,230	0,023
2500	1,755	0,018
3000	1,447	0,015
3500	1,231	0,013
4000	1,071	0,011

1.2.2. Эмпирическая модель точечного взрыва М.А. Садовского

Для аппроксимации избыточного давления на фронте ударной волны $\Delta P(R)$ и удельного импульса I , определяемого для фазы сжатия ($0 < t < t_+$) по формуле,

$$I(R) = \int_0^{t_+} \Delta P(t) dt, \quad (3.2)$$

можно воспользоваться выражениями $\Delta P(R)$ и $I(R)$, предложенными М.А.Садовским [3].

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3}, \quad \text{мПа} \quad (3.3)$$

$$I(R) = 0,4 * C^{2/3} / R, \quad \text{кПа*с} \quad (3.4)$$

$$R_n = R / \sqrt[3]{C}, \quad (3.5)$$

где C - тротилловый эквивалент, кг. Мощность контактного взрыва на неразрушаемой преграде удваивается в связи с формированием полусферической волны. Поэтому величина тротилового эквивалента заряда ВВ увеличивается в два раза ($k=2$). При взрыве на грунте величина тротилового эквивалента увеличивается в 1.2 - 1.8 раза, в зависимости от свойств грунта ($k = 1.2-1.8$). Для песчаной подложки коэффициент $k = 1.2$. Для утрамбованной глины $k = 1.8$.

Таблица 3.2

Энергия взрыва Q [кДж/кг] промышленных ВВ

ВВ	Q [кДж/кг]	ВВ	Q [кДж/кг]
----	-----------------	----	--------------

Тротил (ТНТ)	4240, 4184	Тринитрохлорбензол	4240
Гексоген	5540	Нитрогуанидин	3020
Тэн	5880	Дымный порох	2790
Динитробензол	3650	Пироксилин (N=13.3%)	4370
Тринитробензол	4520	Аммотол 80/20	4200
Пикрат аммония	3360	Октоген	5420
Тринитроанилин	4160	Глигольдинитрат	6640
Аммонийная селитра	1440		

Тропиловый эквивалент ВВ может быть определен в зависимости от энергии взрыва по данным таблицы 3.2, как отношение энергии взрыва ВВ к энергии взрыва тринитротолуола (тротил, ТНТ) $Q_{\text{ТНТ}} = 4240 \text{ кДж/кг}$. Если масса ВВ - $M \text{ [кг]}$, то тротиловый эквивалент определяется

$$C = k * M * Q / Q_{\text{ТНТ}} \quad (3.6)$$

1.2.3. Оценка последствий точечного взрыва

Избыточное давление на фронте ударной волны может быть сопоставлено с величиной перепада давления, отвечающего определенной степени разрушения.

Таблица 3.3

Избыточное давление (кПа), отвечающее определенной степени разрушения

Объект	Степень разрушения		
	Высокая	Средняя	Низкая
Основные промышленные сооружения	40 – 50	30 – 40	20 – 30
Складские здания (кирпичная кладка)	30 – 40	20 – 30	10 – 20
Трансформаторные подстанции (кирпичная кладка)	40 – 60	20 – 40	10 – 20
Линии электропередачи высокого напряжения	80 – 120	50 – 70	30 – 50
Трубопроводы, заглубленные в землю на глубину не менее 20 см		250 – 350	
Деревянные одноэтажные здания (жилые дома)	12 – 20	8 – 12	6 – 8
Одно- двухэтажные каменные здания	25 – 35	15 – 25	8 – 15
Отдельно стоящие деревья. Средняя высота 20–24 м, диаметр 18–27 см		10 – 15	
Лесной массив. Средний возраст деревьев 45–50 лет. Средняя высота 20–24 м, диаметр 18–27 см		5 – 10	

Сопоставляя избыточное давление на фронте ударной волны, с давлением, отвечающим определенной степени разрушения, по данным таблицы 3.3, определяются границы зон разрушений. Сведения, представленные в таблице 3.3, в основном, отвечают обработке экспериментальных данных по разрушению соответствующих объектов (фактически представлены математические ожидания избыточных давлений, отвечающих определенной степени разрушения).

Уровень поражения человека в зависимости от избыточного давления на фронте ударной волны, может быть оценен по данным таблицы 3.4.

Таблица 3.4

Воздействие избыточного давления на человека

Избыточное давление, бар	Уровень поражения человека
5 – 8	Летальный исход
3,5 – 5	Летальный исход в 50% случаев
2 – 3	Пороговое значение для летального исхода
1,3 – 2 < 2 1,3 – 1,5	Тяжелая степень поражения легких, 50% разрыв барабанных перепонок: - возраст до 20 лет - возраст свыше 20 лет

Таким образом, для оценки последствий взрыва конденсированного ВВ:

- Рассчитать $\Delta P(R)$ [формулы (3.3), (3.5), (3.6)]

- Сравнить избыточное давление с данными таблицы 3.3 или с данными таблицы

3.4.

(При первоначальном ознакомлении до конца раздела можно опустить !)

Для более точной оценки последствий взрыва используется модель ущерба при взрыве $U(\Delta P) = \Phi(\text{Pr})$, где $\Phi(z)$ - нормальная функция распределения:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-t^2 / 2) dt = \frac{1 + \text{erf}(z / \sqrt{2})}{2}, \quad (3.6)$$

отвечающая вероятности поражения человека (летальный исход) при воздействии избыточного давления. Pr – пробит функция, которая может быть определена, например, в виде:

$$\text{Pr} = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta p, \quad (3.7)$$

или

$$\text{Pr} = -2,44 \cdot \ln(7380 / \Delta p + 1,9 \cdot 10^9 / (I \cdot \Delta p)), \quad (3.8)$$

где Δp – избыточное давление (Па), I - импульс ($\text{Н}/\text{м}^2\text{с}$).

Таблица 3.5

Вероятность поражения человека при взрыве заряда ВВ 49 тонн и тротиловом эквиваленте равном 1.2

Расстояние от места взрыва, м	Значение пробит-функции	Вероятность поражения человека
50	18,36589353	1
60	15,16950665	1
70	12,55027268	1
80	10,34961541	1
90	8,465106068	1
100	6,82680132	1
120	4,102671184	0,99997957
140	1,912736112	0,97210915
160	0,100837681	0,5401604
180	-1,432175374	0,07604686
200	-2,752701287	0,00295535
300	-7,416287409	6,0729E-14
400	-10,37253832	0
500	-12,50175498	0
700	-15,49825019	0

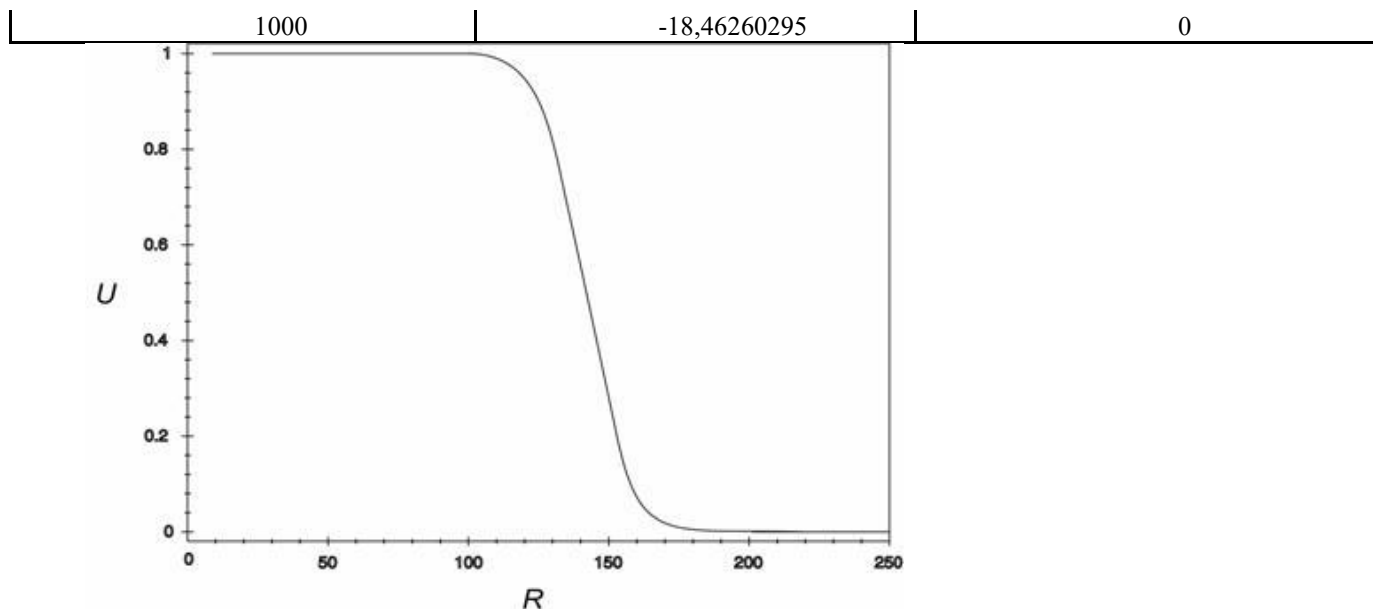


Рис. 3.3. Функция ущерба U в зависимости от расстояния R , м от места взрыва (39 тонн ВВ, Тротильный эквивалент 1.2).

Таблица 3.6

Границы зон 100% и 50% поражения человека, м

Масса ВВ, т	Граница 100%, м	Граница 50%, м
49	110	161
48	109	160
25	90	129
10	70	95
4	50	70

Например, если избыточное давление на фронте ударной волны при взрыве ВВ (масса ВВ 49 тонн, тротильный эквивалент 1.2) отвечает данным, представленным в таблице 3.1, то значения пробит функции и вероятность поражения человека, будут отвечать данным, представленным в таблице 3.5. Графическое представление зависимости вероятности поражения человека от расстояния от места взрыва, представлено на рисунке 4.3.

Данные таблицы 3.6 иллюстрируют результаты расчетов радиусов границ зон 100% и 50% поражения людей от массы ВВ (тротильный эквивалент 1.2).

Таблица 3.7

Параметры для определения радиусов поражения R при взрыве

Характеристика действия ударной волны		I^* , Па*с	P^* , Па	k , Па ² *с
Разрушение зданий				
R_1	Полное разрушение зданий	770	70100	886100
R_2	Граница области частичного разрушения: 50% -75% стен разрушено или находится на грани разрушения	520	34500	541000
R_3	Граница области значительных повреждений: повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку	300	14600	119200

R ₄	Граница области минимальных повреждений: разрыв соединений и расчленение конструкций	100	3600	8950
R ₅	Полное разрушение оконных стекол	0	7000	0
R ₇	50% разрушение оконных стекол	0	2500	0
R ₈	10% разрушение оконных стекол	0	2000	0
Выживание человека при поражении органов дыхания				
R ₉	50% выживания	440	2.43*10 ⁵	1.44*10 ⁸
R ₁₀	Порог выживания	100	6.59*10 ⁴	1.62*10 ⁷

Для оценки зон поражения при взрыве могут быть использованы кривые равновероятного разрушения (поражения) в координатах Δp -I: где $\Delta p(R)$ - максимальное избыточное давление на фронте ударной волны; $I(R)$ - импульс фазы сжатия на расстоянии R от места взрыва. Радиусы соответствующих зон поражения R_i определяются решением уравнения[4]:

$$\frac{k}{\Delta p(R) - P^*} = I(R) - I^*, \quad (3.9)$$

где I^* , P^* асимптотические значения импульса и давления; k - числовой коэффициент.

Значения этих параметров для кривых разрушения зданий и выживания человека при частичном поражении органов дыхания приведены в таблице 3.7.

Зависимости максимального избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния - $\Delta p(R)$ и зависимость импульса фазы сжатия от расстояния - $I(R)$ могут быть определены по формулам (3.3), (3.4).

1.2.4. Примеры решения задач

Задача 1.

Рассчитать давление на фронте ударной волны в точке $R=20$ м при взрыве точечного заряда ТНТ массой M (0.5 кг; 10 кг; 50 кг) в атмосфере, используя приближение Садовского $\Delta p(R,M)$.

Для решения используем GNU Octave

В файле `expl.m` создадим функцию `expl` для расчета избыточного давления (режим «Редактора»)

```
function y = expl(R,Q,M,k)
C = M*(Q/4240)*k;
Rn= R/C^0.333;
y = 0.084./Rn + 0.27./(Rn.*Rn) + 0.7./(Rn.*Rn.*Rn); % Мпа
endfunction
```

В файле `task1.m` создадим файл подготовки данных для решения задачи –

```
for i=1:3
switch i
case 1
M=0.5;
case 2
M=10;
case 3
M=50;
endswitch
```

```
dP = expl(20,4240,M,1)*1000; % кПа
printf(" \t M = %f кг \t dP = %f кПа \n ", M, dP )
endfor
```

Листинг с решением задачи -

```
M = 0.500000 кг      dP = 3.803513 кПа
M = 10.000000 кг     dP = 13.042938 кПа
M = 50.000000 кг     dP = 28.947985 кПа
```

Решение на Си

Решение иллюстрируется программой. Программа допускает ввод нескольких значений массы ВВ. (Программа выходит из цикла обработки при вводе неположительного числа).

```
#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <math.h>
int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[])
{
double C,R=20,dP,M,Rn,CC,dP_kPa;
for(;;)
{
std::cout<<"\n"<<"Please, Input massa exspouse, kg ";
std::cout<<"\n"<<"( also input 0) : ";
std::cin>>M;
if (M<=0)break;
C=M;
CC=pow(C,0.333); Rn=R/CC;
dP=0.084/Rn+0.27/(Rn*Rn)+0.7/(Rn*Rn*Rn); //mPa
dP_kPa=1000*dP; // kPa
std::cout<<"Pressure on the front, kPa "<<dP_kPa<<"\n";
}
return 0; }
```

Пример работы программы.

```
Please, Input massa exspouse, kg
( also input 0) : 0.5
Pressure on the front, kPa 3.80351
```

```
Please, Input massa exspouse, kg
( also input 0) : 10
Pressure on the front, kPa 13.0429
```

```
Please, Input massa exspouse, kg
( also input 0) : 50
Pressure on the front, kPa 28.948
```

Из решения следует, что избыточное давление на фронте ударной волны в точке, расположенной на расстоянии R=20 метрам составляет:

- При взрыве 0.5 кг ТНТ 3.80351 кПа

- При взрыве 10 кг ТНТ 13.0429 кПа
- При взрыве 50 кг ТНТ 28.948 кПа

Задача 2

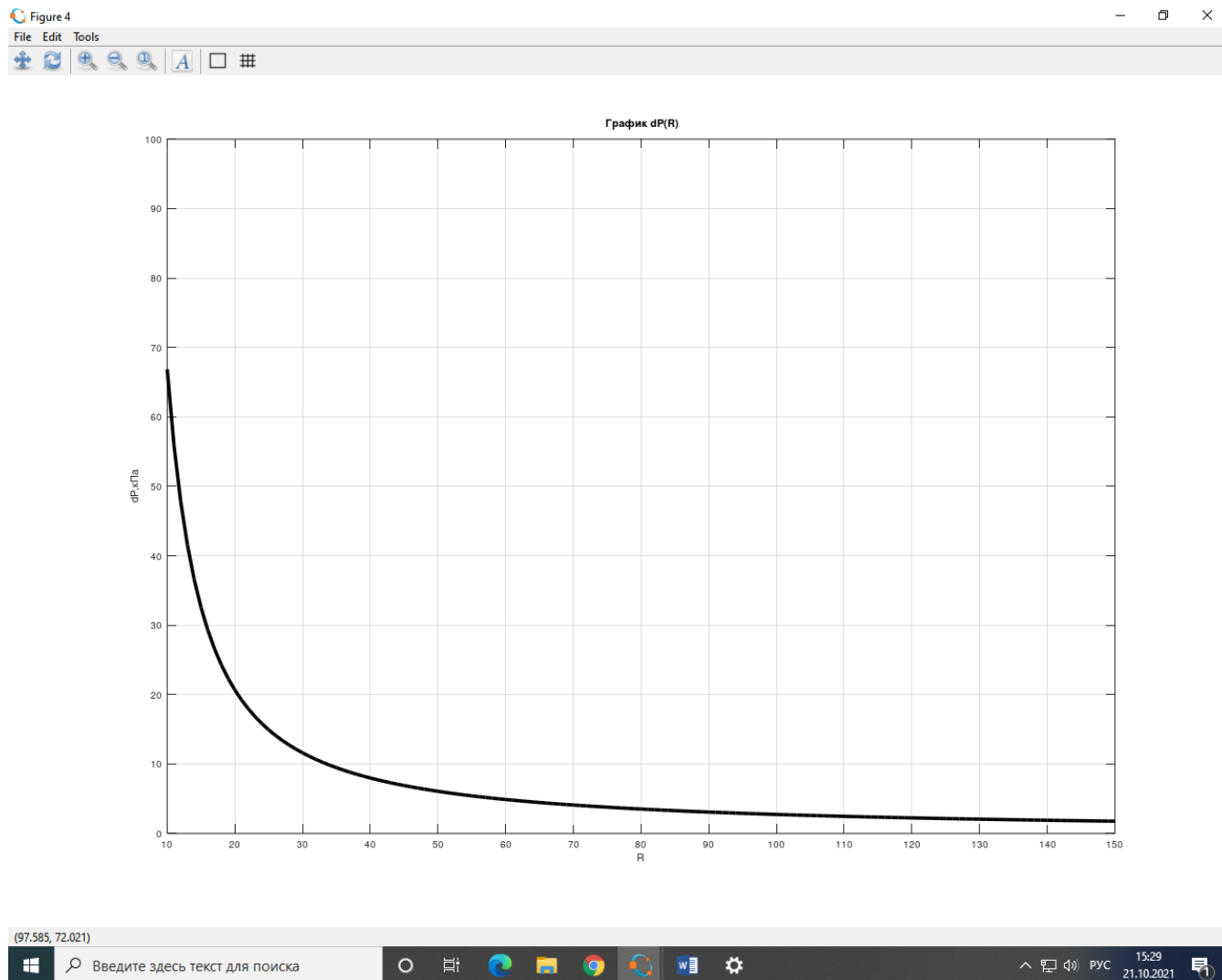
Построить зависимость давления на фронте ударной волны ΔP от расстояния от точки взрыва R при взрыве точечного заряда гексогена массой $M = 10$ кг на бетонной подложке, используя приближение Садовского $\Delta P(R, M)$.

Решение

Воспользуемся функцией `expl` из предыдущей задачи (в файле `expl.m`) и создадим программу для расчетов и построения графика

```
Rstart = 10;    % Область изменения расстояния от точки взрыва, м
Rfinis = 150;
Qg  = 5540; % КДж/кг
M   = 10;   % кг
k   = 2;    % Бетонная подложка
% Построение графика функции dP(R)
cla;
okno1=figure();
R= Rstart:1:Rfinis;           % Создание массива переменной R
dP=expl(R,Qg, M, k)*1000;    % Создание массива переменной dP, кПа
pol=plot(R,dP);              % Создание графика
set(pol,'LineWidth',3,'Color','k'); % Установка толщины и цвета линии
set(gca,'xlim',[Rstart,Rfinis]); % Установка осей
set(gca,'ylim',[0,100]);
set(gca,'xtick',[Rstart:10:Rfinis]); % Вывод сетки с заданным диапазоном
set(gca,'ytick',[0:10:1000]);
grid on;                     % Установка сетки
xlabel('R');ylabel('dP,кПа'); % Подписи осей
title('График dP(R)');       % Подпись графика
```

Решение в виде графика



Решение на Си.

Решение иллюстрируется программой. Программа допускает ввод нескольких значений максимального расстояния, для которого рассчитывается давление на фронте волны. (Программа выходит из цикла обработки при вводе неположительного числа).

```
#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <math.h>
int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[])
{
double C,R,dP,Rn,CC,dP_kPa,R_max, h;
double M=10, I_max=20, Qt=4240, Qg=5540,
      k=2;    // k – коэффициент учитывающий материал подложки
int i;
for(;;)
{
std::cout<<"\n"<<"Massa, kg = "<<M<<"    Please, Input R max, m ";
std::cout<<"\n"<<"( else input 0) :    ";
std::cin>>R_max;
if (R_max<=0)break;
```

```

C=k*M*Qg/Qt;
h=R_max/(I_max-1);
std::cout<<"Dependence of Pressure  on the front at R"<<"\n";
std::cout<<" R,m,    P, kPa "<<"\n";
for(i=1; i<I_max; i++)
{ R=i*h;
  CC=pow(C,0.333); Rn=R/CC;
  dP=0.084/Rn+0.27/(Rn*Rn)+0.7/(Rn*Rn*Rn); //mPa
  dP_kPa=1000*dP; // kPa
  std::cout<<R<<"    "<<dP_kPa<<"\n";
}
}
return 0;
}

```

Пример работы программы –

```

Massa, kg = 10   Please, Input R max, m ";
( also input 0) :   200
Dependence of Pressure  on the front at R
R,m,          P, kPa
10.5263       60.6989
21.0526       19.1344
31.5789       10.843
. . . . .
189.474       1.38293
200           1.30659

```

На расстоянии 200 метров от точки взрыва избыточное давление на фронте ударной волны снижается до 1.30659 кПа.

Задача 3

Определить максимальное расстояние, на котором избыточное давление на фронте ударной волны при взрыве октогена массой М (0.5 кг; 10 кг; 50 кг) достаточно для разрушения деревянного одноэтажного здания - жилого дома (средняя степень разрушения). Взрыв на песчаной подложке.

Решение

По таблице “Избыточное давление (кПа), отвечающее определенной степени разрушения” определяем, что средняя степень разрушения деревянного одноэтажного здания достигается при 8-10 кПа. Принимаем среднее значение – 10 кПа

Решение иллюстрируется программой. Программа допускает ввод нескольких значений массы. (Программа выходит из цикла обработки при вводе неположительного числа).

```

#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <math.h>
int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[])
{
double C,R,dP,Rn,CC,dP_kPa, h;
double M, I_max=201, // дискретность расчета
        R_max=200, // мак. расстояние в пределах которого ведется расчет

```

```

Qt=4240, // энергия ТНТ, кДж/кг
Qg=5420, // энергия октогена, кДж/кг
dPfix_kPa=10, // Критическое значение избыточного давления, кПа
K=1.2; // K- коэффициент учета материала подложки
int i,k;
for(;;)
{
std::cout<<"\n"<<"Please, Input massa, kg " ;
std::cout<<"\n"<<"( also input 0) : ";
std::cin>>M;
if (M<=0)break;
C=K*M*Qg/Qt;
h=R_max/(I_max-1); // Шаг расчета
std::cout<<"Dependence of Pressure on the front at R"<<"\n";
std::cout<<" R,m, P,kPa "<<"\n";

for(i=1; i<I_max; i++)
{ R=i*h;
CC=pow(C,0.333); Rn=R/CC;
dP=0.084/Rn+0.27/(Rn*Rn)+0.7/(Rn*Rn*Rn); //mPa
dP_kPa=1000*dP; // kPa
if (dP_kPa<=dPfix_kPa ) break;
std::cout<<R<<" "<<dP_kPa<<"\n";
}
std::cout<<"\n Building distracted at distance, m "<<R <<"\n\n";
}
return 0;
}

```

Пример работы программы.

Please, Input massa, kg
(also input 0) : 10

Dependence of Pressure on the front at R	
R,m,	P, kPa
1	12580.8
.	
10	48.1994
.	
28	10.0574

Building distracted at distance, m 29

На расстоянии 29 метров от точки взрыва избыточное давление на фронте ударной волны достаточно для разрушения деревянного одноэтажного дома.

Задача 4.

На каком расстоянии от места взрыва будут разрушены кирпичные здания (деревянные здания), если энергия взрыва соответствует 20 тоннам взрывчатого вещества (ВВ)?

1. Взрыв на бетонной подложке, ВВ – ТНТ;

2. Взрыв на грунте, ВВ – дымный порох.

Решение.

Исходные данные задачи по варианту 1:

- ☐ объекты разрушения – кирпичное здание (деревянное здание);
- ☐ взрывчатое вещество – ТНТ;
- ☐ поверхность, на которой возникает взрыв – бетонная подложка;
- ☐ масса взрывчатого вещества – 20 тонн.

Функция избыточного давления на фронте ударной волны зависит от расстояния (от места взрыва до объекта разрушения). По таблице определяем, что избыточное давление для разрушения кирпичного здания (разрушение средней степени) составляет 20-30 кПа.

Зависимость избыточного давления от расстояния представлена выражением:

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3},$$

где $\Delta P(R)$ - избыточное давление, R_n – приведенное расстояние,

которое можно определить по формуле: $R_n = R/\sqrt[3]{C}$. Тротиловый эквивалент C будет равен массе взрывчатого вещества, так как исходное взрывчатое вещество ТНТ, то есть тротил. Но поскольку взрыв происходит на бетонной подложке, то следует учесть коэффициент 2, то есть $C = 40$ т.

Подставляя числовые данные в формулу давления, получаем уравнение третьей степени, которое удобно решить, например, в электронной таблице Excel. Фрагмент электронной таблицы представлен на рисунке 3.4.

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3}$$

В столбце С вычисляется численное значение выражения. В ячейке С11 значение этого выражения приближенно равно нулю. Следовательно, что при $\Delta P = 20$ кПа $R = 235$ м; при $\Delta P = 30$ кПа $R = 185$ м. Единицы измерения, принятые в задаче: давление - МПа, тротиловый эквивалент – кг, расстояние – м.

Деревянные здания (средняя степень разрушения) разрушаются при избыточном давлении 8-12 кПа. Изменяя исходные данные в Excel-таблице, приходим к оценке расстояния, при котором будут разрушены деревянные здания, - 330-440 м.

	A	B	C	D
1	ΔP , МПа			
2	0,02			
3	C , кг			
4	40000			
5	R , м	$R_n = R/\sqrt[3]{C}$	$\Delta P(R) - \frac{0,084}{R_n} - \frac{0,27}{R_n^2} - \frac{0,7}{R_n^3} = 0$	
6	10	0,292		-31,425
7	15	0,439		-9,871
8	20	0,585		-4,413
9	...	...		...
10	230	6,725		-0,001
11	235	6,871		0,000
12	240	7,018		0,001
13	245	7,164		0,001
14	...	...		...
15				

Фрагмент электронной таблицы с решением задачи 4

Ответ (вариант 1): кирпичные здания будут разрушены на расстоянии 185-235 м, деревянные – 330-440 м.

Исходные данные задачи по варианту 2:

- ☐ объекты разрушения – кирпичное здание (деревянное здание);
- ☐ взрывчатое вещество – дымный порох;

- ☐ поверхность, на которой возникает взрыв – грунт;
- ☐ масса взрывчатого вещества – 20 тонн.

В варианте 2 задачи 1 следует обратить внимание на определение тротилового эквивалента. Взрывчатым веществом является дымный порох. Из таблицы 4.2 следует, что энергия взрыва дымного пороха составляет 2790 кДж/кг, а у ТНТ – 4240 кДж/кг. Составляя пропорцию $20 / 4240 = C / 2790$, приходим к величине тротилового эквивалента $C = 13,16 \text{ т} \times 1,8 = 23,689 \text{ т}$. Коэффициент 1,8 учитывает, что взрыв происходит на грунте (для грунта этот коэффициент 1,2 – 1,8; для оценок использовано максимальное значение). Дальнейшее решение выполняется аналогично варианту 1.

Ответ (вариант 2): кирпичные здания будут разрушены на расстоянии 150-195 м, деревянные – 280-370 м.

Задача 5.

Вдоль дороги, по которой перевозят ВВ установлена зона безопасности, ограниченная расстоянием в 25 м от дороги. Под зоной безопасности будем понимать территорию, на которой вероятность поражения человека (летальный исход) должна быть не более 0,005. Какова предельная масса гексогена, которую можно перевозить по дороге?

Решение.

Исходные данные задачи:

- ☐ расстояние от места взрыва до человека $R = 25 \text{ м}$;
- ☐ взрывчатое вещество – гексоген;
- ☐ поверхность, на которой возникает взрыв – бетон;
- ☐ вероятность поражения человека $P \leq 0,005$.

Фактически задача сводится к решению нелинейного уравнения $P(M) - 0.005 = 0$, где M – масса ВВ. Для решения уравнения можно воспользоваться одним из методов численного решения нелинейных уравнений, или использовать процедуру подбора.

Подберем массу ВВ. Энергетический эквивалент гексогена составляет 5540 кДж/кг. Для величины тротилового эквивалента, имеем $C = (M * 5540 / 4240) * 2$. Коэффициент 2 учитывает отражение ударной волны от дороги (бетонная подложка). Для определенности зададим в k -ом столбце n -ой строки численное значение $M = 200 \text{ кг}$. В последующих столбцах последовательно рассчитывается тротильный эквивалент, приведенное расстояние при $R=25 \text{ м}$, избыточное давление на фронте ударной волны – P , значение пробит функции на расстоянии 25 м от дороги $Pr = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta P$, вероятность поражения человека

$$\Phi(Pr) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} \exp(-t^2 / 2) dt$$

В следующем столбце вычисляем значение выражения $F = \Phi(Pr) - 0.005$. Все вычисления повторяются в последующих строках, но уменьшается масса гексогена. Эти вычисления повторяются до тех пор, пока в одной строке функция $F = \Phi(Pr) - 0.005 > 0$, а в следующей строке $F = \Phi(Pr) - 0.005 < 0$, то есть функция меняет знак. Чем меньше интервал изменения ΔM при котором функция меняет знак, тем точнее найдено значение массы гексогена, перевозка которой допущена по дороге.

Задача 5. Вдоль дороги, по которой перевозят ВВ установлена зона безопасности, ограниченная расстоянием в 25 м от дороги. Под зоной безопасности будем понимать территорию, на которой вероятность поражения человека (летальный исход) должна быть не более 0,005.				
Какова предельная масса гексогена, которую можно перевозить по дороге?				
Исходные данные задачи:				
расстояние от места взрыва до человека $R = 25 \text{ м}$;				
взрывчатое вещество – гексоген;				

вероятность поражения человека $P \leq 0,005$.							
M, kg	C, kg	Rn	dP, Мпа	Pr	$\Phi(M)$	$F=\Phi(M)-0.005$	
200	522.64	3.110127	0.07818986	0.754246	0.774649	0.7696493	
100	261.32	3.917609	0.050676098	-2.24252	0.012464	0.0074638	
90	235.19	4.057498	0.04758161	-2.67791	0.003704	-0.001296	
95	248.25	3.985099	0.049140602	-2.45513	0.007042	0.0020416	
94	245.64	3.999167	0.048830744	-2.49884	0.00623	0.00123	
93	243.03	4.013435	0.048519932	-2.54297	0.005496	0.0004958	
92	240.42	4.02791	0.048208149	-2.58751	0.004834	-0.000166	
92.5	241.72	4.020647	0.048364163	-2.56519	0.005156	0.000156	
Ответ: По дороге можно перевозить не более 92.5 кг гексогена.							

Фрагмент электронной таблицы с решением задачи 5.

```
#include <iostream>
#include <math.h>

using namespace std;
double ff(double xx)
{
    double s=0;
    double xs=-10, xf=0, dd;
    int n=200;
    dd=(xx-xs)/(n-1);
    for(int i=1;i<n;i++)
    {
        xf=xs+dd;
        s=s+(exp(-xs*xs/2)+exp(-xf*xf/2));
        xs=xf;
    }
    s=(s*dd/2)/sqrt(2*3.1415);
    return (s);
}

int main()
{
    double C, R=25, dP, M, Rn, CC, dP_kPa,P;
    double Pr=0;
    M=50;
    for(int k=1; k<100; k++)
    {
        M=M+1;
        C=2*M*(5540.0/4240.0);
        CC=pow(C,0.333);
        Rn=R/CC;
        dP=(0.084/Rn)+(0.27/(Rn*Rn))+(0.7/(Rn*Rn*Rn));
        dP_kPa=1000000*dP;
        Pr=-77.1+6.91*log(dP_kPa);
        P=ff(Pr);
        if (P>0.005) {
            std::cout<< "M="<< M << " Pr ="<< Pr<< " " << " P= "<< P<< "\n"; break; }
        return 0;
    }
}
```

}

Задача 6.

Какова вероятность поражения человека при взрыве 10 тонн октогена на бетонной подложке, если расстояние от места взрыва 50 метров, 100 метров?

Решение.

Исходные данные:

- ☐ взрывчатое вещество – октоген;
- ☐ масса взрывчатого вещества – 10 т;
- ☐ поверхность, на которой происходит взрыв – бетонная подложка;
- ☐ расстояние от места взрыва до человека (R) – 50 м., 100 м.

Необходимо определить вероятность поражения человека (Φ).

$$\Phi(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \exp(-t^2 / 2) dt$$

$$\text{Pr} = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta P$$

То есть, решение задачи первоначально сводится к определению избыточного давления на фронте ударной волны ΔP . Для расчета избыточного давления можно воспользоваться приближением Садовского:

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3},$$

$$R_n = R / \sqrt[3]{C}.$$

Для значения R=50 м. Подставляя исходные данные в соответствующие формулы, приходим к численному значению избыточного давления 0,28638 МПа. Численное значение избыточного давления, выраженное в Па, позволяет рассчитать значение пробит-функции:

$$\text{Pr} = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta P$$

В результате получаем значение $\text{Pr} = 9,7249$.

Для расчета вероятности $\Phi(\text{Pr})$ можно воспользоваться функцией «НОРМСТРАСП» (т.е. нормальное стандартное распределение) программного продукта Excel или построить аппроксимацию нормальной функции распределения.

Результатом будет являться значение 1 (или 100%), то есть в пределах данного расстояния (< 50 м) летальный исход для человека в результате аварии составляет 100%. Напомним, что под выражением летальный исход для человека понимается гибель человека с вероятностью 50 %. Это следует из определения данной пробит-функции.

Аналогичный расчет для значения R=100 м приводит к летальному исходу для человека с вероятностью 34,1%.

Задача 7.

На каком расстоянии от места взрыва будут разрушены (средняя степень разрушения) деревянные здания при взрыве 20 тонн тринитротолуола (ТНТ) на бетонной подложке. Деревянные здания (средняя степень разрушения) разрушаются при избыточном давлении 8-12 кПа. Представить график зависимости избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния, с указанием давления, отвечающего разрушению.

Пояснения к решению:

Зависимость избыточного давления ΔP на фронте ударной волны от расстояния R, выраженного

$$\Delta P(R) = \frac{0,084}{R_n} + \frac{0,27}{R_n^2} + \frac{0,7}{R_n^3},$$

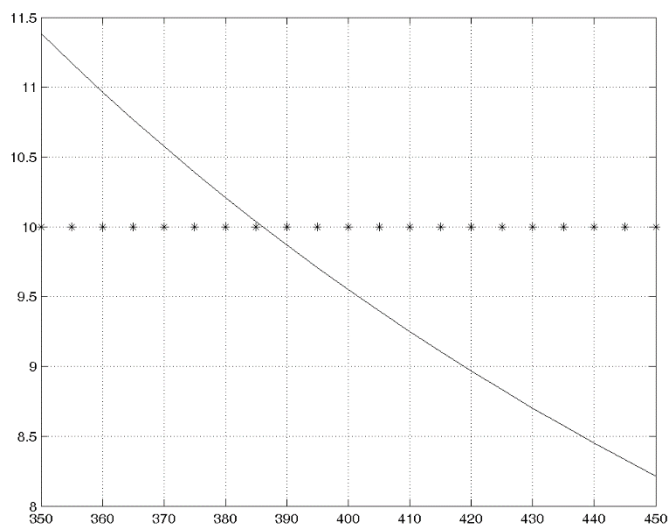
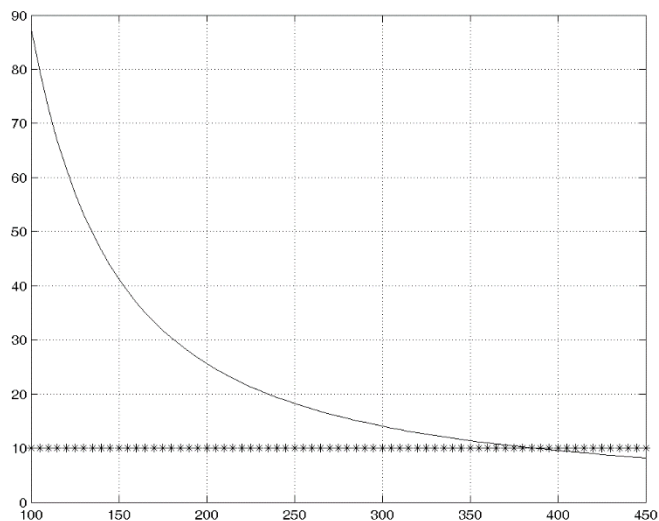
в метрах, представлена выражением

где $\Delta P(R)$ - избыточное давление

в МПа, R_n – приведенное расстояние, которое можно определить по формуле $R_n = R/\sqrt[3]{C}$. Тротиловый эквивалент C будет равен массе взрывчатого вещества, выраженной в кг, так как исходное взрывчатое вещество ТНТ. Но поскольку взрыв происходит на бетонной подложке, то следует учесть коэффициент 2, то есть $C = 40000$ кг.

Для решения задачи используем вычислительную среду MatLab.

```
r=[100:5:450];
C=40000;
Rn=r./C^0.333;
```



Графики, отвечающие решению задачи 7.

```
Rn2=Rn.^2;
Rn3=Rn.^3;
DP=(0.084./Rn+0.27./Rn2+0.7./Rn3)*1000;
plot(r,DP,'k-',r,10,'k*'); grid on;
xlabel('r,m');
ylabel('P, kPa');
title('P=f(r)').
```

Результат работы программы представлен на верхнем рисунке 3.6. Здесь знаком ‘*’ выделено среднее значение давления, отвечающее разрушению деревянных зданий. Для уточнения ответа изменим диапазон изменения переменной r – расстояние от точки $r = 350$ м до точки $r = 450$ м. $r = [350:5:450]$;

График, отвечающий решению задачи, представлен на нижнем рисунке.. Этот график позволяет достаточно точно выделить решение задачи, как точку пересечения графиков.

Ответ: деревянные здания при взрыве 20 тонн тринитротолуола (ТНТ) будут разрушены (средняя степень разрушения) на расстоянии 385 м от места взрыва.

Задача 8.

Оценить вероятность гибели человека, находящегося на расстоянии 25 м от места взрыва, при взрыве 200 кг гексогена. Взрыв на бетонной подложке. Поражающий фактор – избыточное давление. Для оценки вероятности поражения человека от воздействия избыточного давления на фронте ударной волны использовать таблицу значений нормальной функции распределения.

Таблица. Значения нормальной функции распределения:

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

x	$\Phi^*(x)$		x	$\Phi^*(x)$
-0,00	0,5000		0,00	0,5000
-0,10	0,4602		0,10	0,5398
-0,20	0,4207		0,20	0,5793
-0,30	0,3821		0,30	0,6179
-0,40	0,3446		0,40	0,6554
-0,50	0,3085		0,50	0,6915
-0,60	0,2743		0,60	0,7257
-0,70	0,2420		0,70	0,7580
-0,80	0,2119		0,80	0,7881
-0,90	0,1841		0,90	0,8159
-1,00	0,1587		1,00	0,8413
-1,10	0,1357		1,10	0,8643
-1,20	0,1151		1,20	0,8849
-1,30	0,0968		1,30	0,9032
-1,40	0,0808		1,40	0,9192
-1,50	0,0668		1,50	0,9332
-1,60	0,0548		1,60	0,9452
-1,70	0,0446		1,70	0,9554
-1,80	0,0359		1,80	0,9641
-1,90	0,0288		1,90	0,9713
-2,00	0,0228		2,00	0,9772

Решение представлено программой (на языке Java) -

```
import java.text.DecimalFormat;
public class exs {

public static void main(String[] args) {
    DecimalFormat b = new DecimalFormat("#0.00");
    double k=2;
    double M=200.0;           // масса, кг
    double R0=25.0;           // расстояние, м
    double dp=f_dp(k,M,R0);   // расчет избыточного давления
    double Pr=f_Pr(dp);       // расчет значения пробит-функции
    double f=FF(Pr);          // Расчет вероятности
    System.out.print("  M,кг =" +b.format(M)+ "    R0,м = " +b.format(R0)+ "    dp,Па = "
                    +b.format(dp)+" Pr= " +b.format(Pr));
    System.out.println("  P= " +b.format(f));
}

//          Расчетные методы класса
static double f_dp(double k, double M, double R0){
    double C = k*M*5540.0/4240;
    double Rn= R0/Math.pow(C, 0.3333);
    double dp= (0.084/Rn + 0.27/(Rn*Rn) + 0.7/(Rn*Rn*Rn))*1000000;
    return dp;}

static double f_Pr(double dp){
    double Pr= -77.1+6.91*Math.Log(dp);
    return Pr;}

static double FF(double Pr){
    double [] x = new double [41];
    int nn=41;
    double xx = -2.1, dx = 0.1;
    double [] P = new double [41];
//  таблица значений нормальной функции распределения
    P[0]= 0.0228;
    P[1]= 0.0288;
    P[2]= 0.0359;
    P[3]= 0.0446;
    P[4]= 0.0548;
    P[5]= 0.0668;
    P[6]= 0.0808;
    P[7]= 0.0968;
    P[8]= 0.1151;
    P[9]= 0.1357;
    P[10]=0.1587;
    P[11]=0.1841;
    P[12]=0.2119;
    P[13]=0.2420;
    P[14]=0.2743;
    P[15]=0.3085;
    P[16]=0.3446;
    P[17]=0.3821;
    P[18]=0.4207;
    P[19]=0.4602;
    P[20]=0.5000;
    P[21]=0.5398;
    P[22]=0.5793;
    P[23]=0.6179;
    P[24]=0.6554;
    P[25]=0.6915;
    P[26]=0.7257;
```

```

P[27]=0.7580;
P[28]=0.7881;
P[29]=0.8159;
P[30]=0.8413;
P[31]=0.8643;
P[32]=0.8849;
P[33]=0.9032;
P[34]=0.9192;
P[35]=0.9332;
P[36]=0.9452;
P[37]=0.9554;
P[38]=0.9641;
P[39]=0.9713;
P[40]=0.9772;
for (int i=0;i<nn;i++){    xx=xx+dx; x[i]=xx;    }

if (Pr<-2) return 0;
if (Pr>2) return 1;
int ii=0;
for (int i=0;i<nn;i++){
    if ((Pr>x[i]) && (Pr< x[i+1])) { ii=i;    break; } }
double ff;
ff = P[ii]+ (((Pr-x[ii])*(P[ii+1]-P[ii]))/(x[ii+1]-x[ii]));
return ff; }
}

```

Результат работы программы

$M, \text{кг} = 200,00$ $R_{0, \text{м}} = 25,00$ $dp, \text{Па} = 78477,08$ $Pr = 0,78$ $P = 0,78$

Таким образом, вероятность гибели человека на расстоянии 25 метров при взрыве 200 кг ТНТ – 0,78.

Задача 9.

Оценить вероятность гибели человека, находящегося на расстоянии 40 м от места взрыва, при взрыве 500 кг гексогена. Взрыв на бетонной подложке. Поражающий фактор – избыточное давление.

Для значения $R=40$ м численному значению избыточного давления 0.057164 МПа. Численное значение избыточного давления, выраженное в Па, позволяет рассчитать значение пробит-функции:

$$Pr = -77.1 + 6.91 \cdot \ln \Delta P.$$

В результате получаем значение $Pr = -1.41$. Вероятность поражения человека $P = 0.079$. Программа расчета представлена ниже:

```

#include <iostream>
#include <math.h>
using namespace std;
double ff(double xx)    // Подпрограмма расчета интеграла
{
    double s=0;
    double xs=-10, xf=0, dd;
    int n=100;

```

```

dd=(xx - xs)/(n-1);
for(int i=1; i<n; i++)
{
    xf=xs+dd;
    s=s+(exp(-xs*xs/2)+exp(-xf*xf/2));
    xs=xf; }
s=(s*dd /2 )/sqrt(2*3.1415);
return (s);
}

int main()
{
    double R=40, M=500, k=2;
    double C, dP, Rn, CC, dP_kPa, Pr, P;
    double Qg = 5540, Qt = 4240; // Энергия взрыва гексогена и тротила
    C=k*M*(Qg/Qt);
    CC=pow(C,0.333);
    Rn=R/CC;
    dP=0.084/Rn+0.27/(Rn*Rn)+0.7/(Rn*Rn*Rn); //mPa
    dP_kPa=1000000*dP; // Pa
    Pr = -77.1+6.91*log(dP_kPa);
    P = ff(Pr);
    std::cout <<" R "<< R << " dP(mPa)= "<< dP<<" Pr ="<< Pr << " P= "<< P<<
    "\n";
    return 0;
}

```

Результат работы программы

```
R  40 dP(mPa)= 0.0571642 Pr =-1.41005 P= 0.079394
```

Задачи для самостоятельного решения

1. На каком расстоянии от места взрыва будет повален лес, если произошел взрыв 30 тонн тринитробензола?
2. Произошел взрыв 15 тонн гексогена. На каком минимальном расстоянии от места взрыва вероятность гибели человека составляет менее 0,002? Взрыв происходит на бетонной подложке.
3. На каком расстоянии от места взрыва вероятность поражения человека составит 0.5; взрывчатое вещество – гексоген. Масса ВВ – 10 кг. Взрыв на бетонной подложке.
4. На каком расстоянии от техногенного объекта можно прокладывать подземный трубопровод, если на объекте возможен взрыв 10 тонн аммонийной селитры?
5. На каком расстоянии от техногенного объекта вероятность поражения человека ударной волной не превышает значения 0.0001, если на объекте возможен взрыв 20 тонн пикрата аммония?
6. Каковы границы зон 100% и 50% поражения человека при взрыве 20 тонн гексогена на бетонной подложке.

Список литературы

1. Неустановившиеся движения сплошной среды / / Станюкевич К. П. М., “Наука”, 1971.
2. Точечный взрыв. (Методы расчета. Таблицы). / Кестенбойм Х. С., Росляков Г. С., Чудов Л. А., М., “Наука”, 1974.
3. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Книга 1 / В.А. Котляревский, К.Е. Кочетков, А.А. Носач, А.В. Забегаев и др. Под ред.: К.Е. Кочеткова, В.А. Котляревского и А.В. Забегаева, — М., Издательство АСВ, 1995. — 320 с.
4. Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности. — РАО “ГАЗПРОМ”. М.: 1996