

ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ АВАРИЙНОГО ПАДЕНИЯ САМОЛЕТА, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ИНФРАСТРУКТУРУ ТЕРРИТОРИЙ

Котляревский Владимир Абрамович

Главный научный сотрудник Научно-образовательного центра исследования экстремальных ситуаций Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФСР

Вероятность катастрофических последствий падения самолетов на порядки выше посещения Земли космических тел [1, 2]. По имеющимся данным [3], на миллион (N) полетов кампании «Аэрофлот» приходится $n = 18,62$ катастроф. Из доклада 2006 г кампании общее число рейсов за год составило $N_G = 247$ тысяч. Время выполнения миллиона рейсов $T_r = N/N_G = 4,05$ года. Технический аварийный риск полета самолетами кампании «Аэрофлот» равен $n/(N \cdot T_r) = 18,62/(10^6 \cdot 4,05) = 4,6 \cdot 10^{-6}$ ед./рейсо-год. По статистике реальный индивидуальный риск гибели в авиакатастрофе (2006-г.) на самолетах российских компаний составляет $8,6 \cdot 10^{-5}$, на самолетах зарубежных компаний (Европа и США) – $0,65 \cdot 10^{-5}$. Прогнозирование возможных последствий авиакатастроф является актуальной задачей.

С аварийным падением самолета при ударе о землю и разливе топлива из разрушенных баков возможно возгорание разлива и пожар, возникновение детонации или дефлаграционного взрыва испарившегося облака, а также огненного шара. Удар самолета о земную поверхность возбуждает сейсмические волны. То есть вследствие падения самолета высока вероятность гибели экипажа и пассажиров, а также возможно появление поражающих факторов, вызывающих сгорание, разрушение различных объектов и травмирование людей на местности.

Поражающий эффект аварийного падения самолета зависит от взлетной массы самолета $M_{\text{сам}}$, остатка массы M_T и типа топлива в баках, а также высоты падения h_p . Коммерческие самолеты различных типов со взлетной массой $M_{\text{сам}} = 300\text{--}400$ т могут иметь в баках топливо со средним отношением исходной массы к взлетной массе $\beta_0 = M_{T0}/M_{\text{сам}} \sim 30\text{--}35\%$ и более. Например, для Боинга 777-300 с $M_{\text{сам}} = 297,56$ т максимальная масса топлива 171 тыс. л., то есть при плотности авиакеросина 775 кг/м^3 отношение $\beta_0 \sim 0,45$. Остаток массы топлива в полете перед аварией (или отношение $\beta_1 = M_T/M_{\text{сам}}$) в зависимости от типа самолета и условий полета может быть в широких пределах.

Возможный сценарий аварийного падения самолета, зависящий от большого числа случайных факторов, предвидеть практически невоз-

можно, и на практике различные аварийные процессы часто рассматривают отдельно или устанавливают на основании экспертных оценок. Статистические вероятности различных сценариев развития аварии с выбросом жидких углеводородов таковы [9]:

Сценарий аварии	Вероятность	Сценарий аварии	Вероятность
Факел	0,0574	Сгорание с развитием избыточного давления	0,0119
Огненный шар	0,7039		
Горение пролива	0,0287	Без горения	0,0292
Сгорание облака	0,1689	Итого	1

Далее приведены алгоритмы анализа основных аварийных процессов, реализованные в программах FIRE [4], EXPLOS [5, 6], GPVS [7, 8] и KOSMOS [1] с использованием нормативных положений документов [9-11] и работ [12, 13]. Программа FIRE служит для определения максимальных значений интенсивности и дозы теплового излучения в функции дистанции от центра пожара пролива, а также дозы для подвижного облучаемого объекта в процессе эвакуации с некоторой скоростью. Программы EXPLOS и GPVS вычисляют по ряду сценариев распределения параметров детонационного объемного взрыва, дефлаграционного взрывного превращения облаков испарений выброса топлива из баков самолета и параметров огненного шара при дефлаграции. Программа KOSMOS прогнозирует сейсмический эффект падения самолета.

Приведены результаты моделирования вероятных аварийных событий в энергетических переменных, позволяющие прогнозировать последствия падения самолета с произвольными исходными данными: по взлетной массе и величине возможного энергозапаса – массы топлива в баках. Действие поражающих факторов на здание и людей на территории проиллюстрировано на примере аварии тяжелого коммерческого самолета. Результаты анализа представлены в четырех разделах: 1 – Пожары, 2 – Детонационный взрыв, 3 – Дефлаграционные превращения, 4 – сейсмический эффект удара.

1. ПОЖАРЫ

1.1. Распределение параметров пожара по координате

При пожаре аварийного выброса и разлива топлива поражающее (воспламеняющее) действие теплового излучения на различные объекты определяется потоком (интенсивностью) излучения q и дозой (импульсом) Q . В процессе выброса площадь разлива S увеличивается, в некото-

рый момент происходит воспламенение, и дальнейшее расширение площади пожара прекращается при полном выгорании топлива в момент времени τ .

Положим, что с момента $t = 0$ начала выброса и воспламенения топлива происходит разлив горящего продукта с постоянной скоростью фронта разлива и пламени V_{ϕ} . Площадь горящего разлива S с координатой фронта z_{ϕ} возрастает со временем t , и для фиксированной точки на местности с дистанцией $r \geq z_{\phi}$ (за пределами горения) интенсивность излучения определяется функцией времени $q[r, S(t)]$. Доза (импульс) облучения находится интегралом

$$Q(r, t) = \int_0^t q[r, S(t)] dt, \quad t \leq \tau. \quad (1.1)$$

Если в фиксированной точке местности на дистанции r , м, от центра разлива (пожара) интенсивность теплового излучения $q(r)$, кВт/м², постоянна, то доза теплового облучения $Q(r)$, кДж/м², зависит от интенсивности $q(r)$ и длительности воздействия (экспозиции τ) [9]

$$Q = q(r) \cdot \tau. \quad (1.2)$$

причем экспозиция τ , с, соответствует времени полного выгорания топлива на площади S , м², с удельной массовой скоростью выгорания m , кг/(м²·с):

$$\tau = M_T / (m \cdot S). \quad (1.3)$$

Интенсивность излучения q , кВт/м²,

$$q = E_f F_q \alpha, \quad (1.4)$$

где E_f – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт/м²;

F_q – угловой коэффициент облученности;

α – коэффициент пропускания атмосферы.

Эффективный диаметр разлива d , м, равен

$$d = \sqrt{4S/\pi},$$

высота пламени H , м,

$$H = 42d \left[m / (\rho_0 \sqrt{g \cdot d}) \right]^{0,61}, \quad (1.5)$$

коэффициент пропускания атмосферы α ($K = 1 \text{ м}^{-1}$ – коэффициент размерности)

$$\alpha = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} K(r - 0,5d)] \quad (r \geq 0,5d). \quad (1.6)$$

Угловой коэффициент F_q определяется по формуле

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (1.7)$$

в которой величины F_V и F_H вычисляются из соотношений

$$S_1 = 2r/d; \quad h = 2H/d; \quad \eta_1 = (h^2 + S_1^2 + 1)/(2S_1); \quad \eta_2 = (1 + S_1^2)/(2S_1);$$

$$\lambda_i = \arctg \sqrt{(\eta_i + 1)(S_1 - 1)/[(\eta_i - 1)(S_1 + 1)]} \quad (i = 1, 2),$$

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{S_1} \cdot \arctg \left(\frac{h}{\sqrt{S_1^2 - 1}} \right) + \frac{h}{S_1} \left\{ \arctg \left(\sqrt{\frac{S_1 - 1}{S_1 + 1}} \right) - \frac{\eta_1}{\sqrt{\eta_1^2 - 1}} \cdot \lambda_1 \right\} \right],$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left[\frac{(\eta_2 - 1/S_1)}{\sqrt{\eta_2^2 - 1}} \cdot \lambda_2 - \frac{(\eta_1 - 1/S_1)}{\sqrt{\eta_1^2 - 1}} \cdot \lambda_1 \right].$$

Проведены расчеты для аварийного падения тяжелого самолета со взлетной массой $M_{сам} = 400$ т. Топливо – авиакеросин марок ТС-1 и РТ [14]: плотность $\rho_T = 775$ кг/м³, теплота сгорания $Q_0 = 43,12$ МДж/кг, температура самовоспламенения 220° С, температура самовоспламенения паров: нижний/верхний пределы 25/65° С, концентрационные пределы взрываемости нижний/верхний пределы 1,5/8,0 %об. Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени E_f и скорость выгорания m приняты (по дизтопливу) равными: $E_f = 18$ кВт/м², $m = 0,04$ кг/(м²·с). Масса топлива в баках M_T в момент аварии, отнесенная к полной массе принимается в пределах $\beta_1 = 0,175 - 0,35$.

Рассмотрим начальную фазу развития пожара выброса 70 т ($\beta = 0,175$) авиакеросина при скорости фронта разлива (и пламени) $V_\Phi = 10$ м/с. По значениям координаты фронта пламени $z_\Phi = V_\Phi t$, площади пожара $S(t) = \pi z_\Phi^2$ и толщины горящего слоя $\delta(t) = M_T / (\rho_T S)$ (при плотности разлива $\gamma = \rho_T \delta$) определены изменения со временем параметра q и интегрированием по (1.1) – параметра Q на двух дистанциях. Из табл. 1.1 видно, что при достаточно реальной скорости развития разлива предельная для устойчивого горения толщина слоя достигается весьма быстро, – за время менее 10 с, при пренебрежимо малых дозах облучения на дистанциях 100 и 200 м без заметного выгорания топлива.

Таблица 1.1

Развитие площади S горения со скоростью фронта пламени 10 м/с с уменьшением толщины слоя δ и параметры термического действия пожара 70 т топлива на дистанциях 100 и 200 м

$r, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	0	1	2	3	4	5	6	7
	$z_{\Phi}, \text{ м}$	0	10	20	30	40	50	60	70
	$S, \text{ м}^2$	0	314	1257	2827	5027	7854	11310	15394
	$\delta, \text{ мм}$	0	288	72	32	18	11,5	8,0	5,9
$r_1 = 100$	$q, \text{ кВт/м}^2$	0	0,054	0,202	0,477	0,967	1,654	2,547	3,677
	$Q, \text{ кДж/м}^2$	0	0,121	0,445	1,158	2,433	4,561	7,426	
$r_2 = 200$	$q, \text{ кВт/м}^2$	0	0,0063	0,024	0,0584	0,124	0,222	0,358	0,538
	$Q, \text{ кДж/м}^2$	0	0,0145	0,0534	0,142	0,310	0,605	1,077	

То есть имеются доводы вести расчет, полагая образование разлива мгновенным при постоянной площади тонкого слоя или иной площади, диктуемой условиями местности. Данная предпосылка использована в расчетном алгоритме (1.2)–(1.7), реализованном в программе FIRE, в которой по типу топлива, площади и массе пролива определяются значения интенсивности $q(r)$ и дозы $Q(r)$ теплового излучения в функции дистанции от центра пожара пролива.

Приведем результаты вариантных расчетов по программе FIRE. По различным значениям относительной массы топлива β_1 , толщины δ топливного слоя и соответствующим значениям плотности $\gamma = \rho_T \delta$, площади $S = M_T / \gamma$ и радиуса r_0 разлива определены экспозиция и высота пламени (табл. 1.2). Параметры пожара – распределения по координате r интенсивности излучения $q(r)$ (за внешней кромкой пожаров при $r > r_0$) и дозы облучения $Q(r)$ при воспламенении 70 т топлива и трех значениях площади S представлены в табл. 1.3 и на рис. 1.1. Интенсивность теплового излучения $q(r_0) = 12,66 \text{ кВт/м}^2$.

Возможные результаты действия теплового излучения пожаров проливов жидкого топлива на людей можно оценить по величине дозы, вызывающей поражение различной степени. По [9], ожогам 1-й степени соответствует граничное значение дозы $Q = 120 \text{ кДж/м}^2$, 2-й степени 220 кДж/м^2 и 3-й степени 320 кДж/м^2 . По представленным результатам расчета опасность ожогов стационарного реципиента возможна на дистанциях $r \leq 150 \text{ м}$.

Таблица 1.2

Площадь S и радиус r_0 аварийного разлива авиакеросина,
экспозиция τ и высота пламени H
при различных значениях массы M_T
и толщины δ горящего слоя

δ , мм	30			20			10		
B_I	0,175	0,25	0,35	0,175	0,25	0,35	0,175	0,25	0,35
M_T , т	70	100	140	70	100	140	70	100	140
γ , кг/м ²	23,3			15,5			7,75		
S , м ²	3011	4301	6022	4516	6452	9032	9032	12903	18065
r_0 , м	31,0	37,0	43,8	37,9	45,3	53,6	53,62	64,1	75,8
τ , мин.	9,7			6,5			3,23		
H , м	46,2	52,3	58,8	53,2	60,3	67,7	67,8	76,7	86,2

Таблица 1.3

Интенсивность q (кВт/м²) и доза Q (кДж/м²)
теплого излучения пожара на дистанциях r
при воспламенении 70 т топлива
выброса на площадях S

S , м ²	r , м	54	74	84	94	104	124	154	204	304	404	504
3000	q	2,6	1,18	0,841	0,615	0,46	0,275	0,14	0,06	0,017	0,007	0,003
	Q	1520,0	686,2	488,5	357,1	267,5	159,6	82,9	34,7	9,72	3,84	1,88
4500	q	4,1	1,89	1,36	1,01	0,76	0,459	0,24	0,10	0,028	0,011	0,005
	Q	1592,1	732,6	527,7	390,1	294,8	177,9	93,2	39,1	11,0	4,3	2,1
9000	q	11,4	4,20	3,05	2,29	1,76	1,09	0,53	0,25	0,071	0,028	0,013
	Q	2217,1	814,2	590,0	444,0	341,4	212,0	113,8	48,6	13,7	5,42	2,58

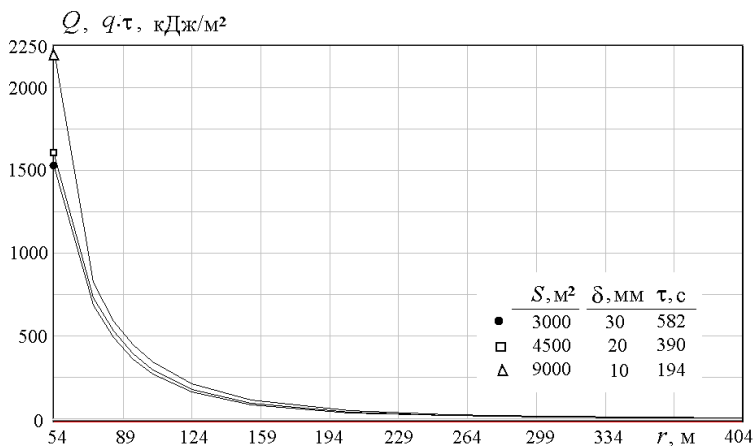


Рис. 1.1. Параметры пожара 70 т авиакеросина на расстояниях r при различных площадях разлива S

1.2. Параметры пожара для подвижных объектов в процессе эвакуации

Оценка поражающего действия излучения на подвижный объект (на людей, на транспортные средства с людьми в процессе эвакуации) определяется интенсивностью излучения $q[r(t)]$ и дозой $Q[r(t)]$ на расстояниях, возрастающих со временем до полного выгорания топлива.

Условная вероятность поражения человека тепловым излучением по [9] определяется с применением формулы для «пробит-функции» $P_r = -14,9 + 2,56 \ln = (\tau q^{1,33})$. Данная оценка предполагает для условной дозы использование параметра $\tau q^{1,33}$ и формулы $\tau = t_0 + x/v$, в которой t_0 – время обнаружения пожара (допускается принимать 5 с), x – расстояние от места расположения человека до зоны с интенсивностью 4 кВт/м^2 , v – скорость движения человека (допускается принимать $v = 5 \text{ м/с}$), q – интенсивность излучения в исходном месте положения человека.

Уточним расчет, учтя изменение со временем интенсивности излучения с координатой. Пусть в момент воспламенения $t = 0$ объект, расположенный на дистанции $r = r_0$ от центра пожара, начинает смещаться от центра со скоростью v . Интенсивность действующего на объект излучения будет убывать во времени с увеличением дистанции при накоплении дозы Q_L к моменту t , определяемой интегралом

$$Q_L = \int_0^t q[r(t)] dt. \quad (1.8)$$

Конечное значение t может быть принято равным времени выгорания τ или иному времени, например соответствующему предельно допустимому значению $q \sim 4 \text{ кВт/м}^2$. Далее рассмотрено движение с постоянной скоростью $v = \text{const}$, для которого $r = r_0 + v \cdot t$, $t \leq \tau$. Алгоритм реализован в программе FIRE.

Таблица 1.4
Изменения со временем t дистанции r , интенсивности q и дозы Q теплового излучения для подвижного объекта со скоростью эвакуации 5 м/с

$t, \text{с}$	0	3,13	6,25	12,5	18,8	25,0	31,3	37,5	43,8	50,0	56,3	62,5	68,8
$r, \text{м}$	54	69,6	85,3	116,5	147,7	179,0	210,3	241,5	272,8	304,0	335,3	366,5	397,8
$q, \text{кВт/м}^2$	11,4	4,92	2,94	1,30	0,66	0,37	0,23	0,14	0,10	0,07	0,05	0,04	0,03
$Q, \text{кДж/м}^2$	0	25,56	37,84	50,12	56,35	59,51	61,36	62,52	63,28	63,81	64,19	64,47	64,68

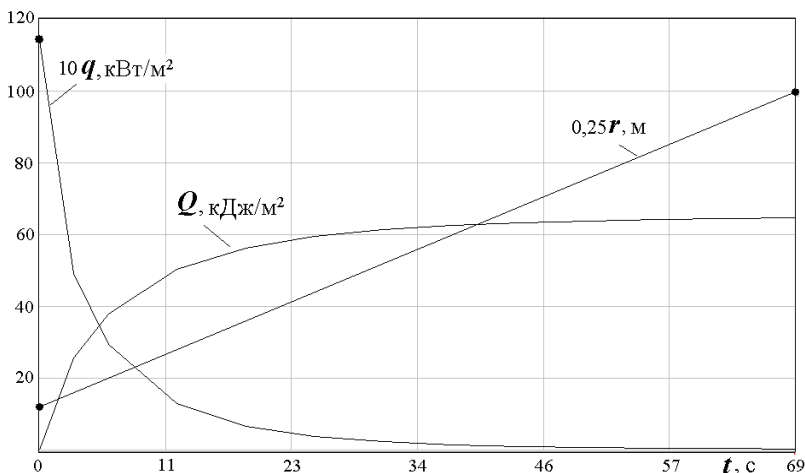


Рис. 1.2. Интенсивность теплового излучения q и доза Q , действующие на объект, удаляющийся от пожара (на дистанциях r) со скоростью 5 м/с

Счет с исходными данными предыдущего варианта ($M_T = 70$ т, $S = 9000$ м²) выполнен для подвижного объекта в процессе эвакуации от точки с начальной координатой $r_0 = 54$ м со скоростью 5 м/с на дистанции до 400 м (табл. 1.4, рис. 1.2). При указанной скорости доза, получаемая реципиентом, безопасна – не превышает 70 кДж/м².

2. ДЕТОНАЦИОННЫЙ ВЗРЫВ

При аварийном падении самолета (рис. 2.1), вскрытии баков, выбросе и интенсивном испарении жидких углеводородных топлив с образованием газопаровоздушных облаков возможно их воспламенение, быстрое сгорание (дефлаграция), а также детонационный взрыв. Ниже рассмотрены характеристики детонации испарившегося облака.

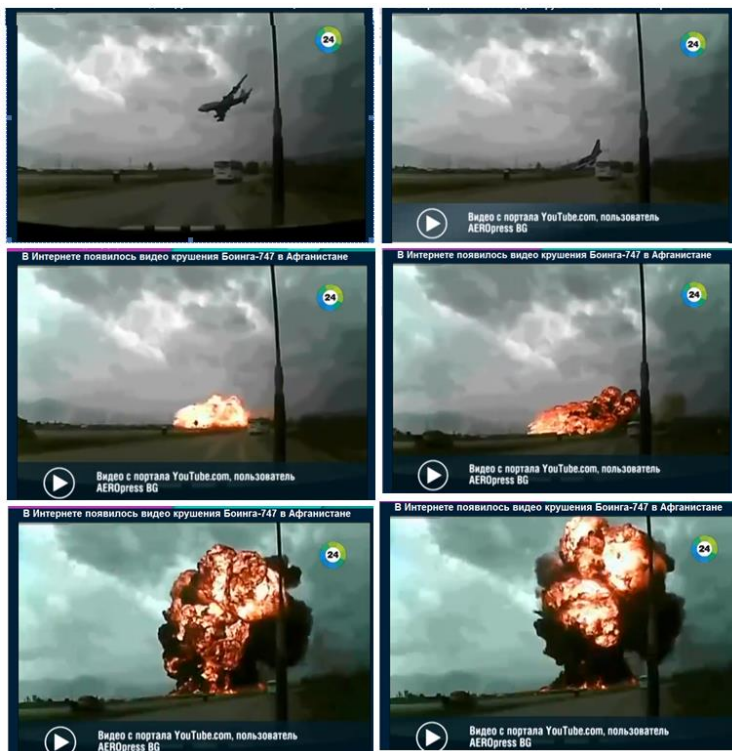


Рис. 2.1. Трагическая катастрофа падения самолета БОИНГ-747 29 апреля 2014 г. в Афганистане

2.1. Параметры ударной волны при детонации облака испарившегося топлива

Обычно в расчете принимают, что сформировавшееся облако имеет полусферическую форму и расположено у поверхности земли. Поэтому для учета эффекта взаимодействия с грунтом (отражения взрывной волны от земной поверхности) расчетное значение массы выброса удваивают. Кроме того, поскольку при выбросах не все количество жидкого продукта переходит в облако, к удвоенному расчетному значению массы продукта вводят коэффициент $\nu \leq 1$, значение которого при растекании легковоспламеняющихся жидкостей принимают в пределах 0,02–0,07.

Начальный радиус R_0 , м, полусферического облака в зависимости от его объема V_0 , м³,

$$R_0 = \sqrt[3]{3V_0/(2\pi)}. \quad (2.1)$$

Поскольку согласно закону Авогадро киломоль идеального газа занимает фиксированный объем ($V_a = 22,4$ м³), для газовой смеси стехиометрического состава с объемной концентрацией $C_{СТХ}$ и молекулярной массой μ_{Γ} горючей компоненты массы M объем облака равен

$$V_0 = V_a \nu M/(\mu_{\Gamma} C_{СТХ}). \quad (2.2)$$

Воспламенение облака газозвдушной смеси (ГВС) происходит при наличии источника зажигания. При этом возможен переход дозвукового дефлаграционного режима с ускоряющимся пламенем к детонационному сверхзвуковому, в частности, под влиянием препятствий – турбулизаторов пламени.

При детонации облака ГВС параметры ударной волны в энергетических координатах определяют в функции параметра $\lambda = \lambda(R, E)$ [10, 15-18]

$$\lambda = R/\sqrt[3]{E}. \quad (2.3)$$

где R – расстояние от центра взрыва облака вблизи земной поверхности, м;
 E – эффективный энергозапас, МДж, определяемый удельной теплотой q_{Γ} , МДж/кг, взрывного превращения топлива в облаке:

$$E = 2\nu M q_{\Gamma}, \quad q_{\Gamma} \cong 44\beta, \quad (2.4)$$

где M – масса топлива, кг ($M_{\text{эф}} = 2\nu M$ – эффективная масса);

β – коэффициент типа топлива, принимаемый для приближенной оценки теплоты сгорания топлива в газовой смеси (для керосина $\beta=1$);

ν – доля топлива в облаке. На границе облака $R \cong R_0$ коэффициент $\lambda \cong \lambda_{кр} \cong 0,33 \text{ м/МДж}^{1/3}$.

Поражающее действие проходящей ударной волны характеризуется амплитудой избыточного давления/разрежения $\Delta P_{+/-}$, МПа; удельным импульсом фазы сжатия ударной волны/фазы разрежения $J_{+/-}$, МПа·с и временем фазы сжатия/фазы разрежения $\tau_{+/-}$, с, определяемыми по формулам

$$\psi = a \exp[b + c \ln \lambda + d (\ln \lambda)^2] \quad (\lambda \geq 0,33), \quad (2.5)$$

$$\psi = a \exp[b - 1,109c + 1,229d] \quad (\lambda < 0,33). \quad (2.6)$$

Значения коэффициентов даны в табл. 2.1, в которой приняты обозначения:

$$P_{+/-}^* = \Delta P_{+/-} / P_0;$$

$$J_{+/-}^* = 10 \xi J_{+/-}, \text{ МПа}^{2/3} \cdot \text{с}; \quad \tau_{+/-}^* = \xi \tau_{+/-},$$

с·МПа^{-1/3}; $\xi = 1/\sqrt[3]{E}$, МДж^{-1/3}; P_0 – атмосферное давление. При $\lambda < 0,33 \text{ м/МДж}^{1/3}$ (в зоне облака) параметры ударной волны постоянны, и давление $\Delta P_{+}/P_0 = 18$.

Приведенный алгоритм реализован в программе EXPLOS.

Полученные по программе значения параметров ударной волны в функции энергетической координаты λ при $\nu = 0,02$ приведены в табл. 2.2, а по давлениям и импульсам – на рис. 2.2.

Таблица 2.1

Коэффициенты
в формулах (2.5), (2.6)

ψ	a	B	C	D
P_+^*	1	0,299	-2,058	0,260
P_-^*	-1	-1,460	-1,402	0,079
J_+^*	0,001	-0,843	-0,932	-0,037
J_-^*	-0,001	-0,873	-1,250	0,132
τ_+^*	0,001	0,106	0,448	-0,026
τ_-^*	0,001	1,299	0,412	-0,079

Таблица 2.2

Параметры проходящей ударной волны детонационного взрыва
в энергетических переменных

λ	P_+^*	P_-^*	$10^4 J_+^*$	$10^4 J_-^*$	$10^3 \tau_+^*$	$10^3 \tau_-^*$
0,330	18,1778	-0,8021	8,206	-13,178	0,748	2,447
0,400	11,0565	-0,8021	8,206	-13,178	0,748	2,447
0,500	6,3625	-0,6375	8,067	-10,585	0,805	2,652
0,600	4,1284	-0,4852	6,862	-8,187	0,878	2,808
0,700	2,8041	-0,3868	5,873	-6,634	0,845	3,133
0,800	2,1623	-0,3188	5,288	-5,557	1,005	3,331

Окончание табл. 2.2

λ	P_+^*	P_-^*	$10^4 J_+^*$	$10^4 J_-^*$	$10^3 \tau_+^*$	$10^3 \tau_-^*$
0,900	1,6788	-0,2684	4,746	-4,772	1,060	3,507
1,000	1,3485	-0,2322	4,304	-4,177	1,112	3,666
1,100	1,1108	-0,2033	3,837	-3,712	1,160	3,310
1,200	0,8347	-0,1803	3,627	-3,340	1,205	3,841
1,300	0,8001	-0,1616	3,362	-3,037	1,248	4,062
1,400	0,6848	-0,1462	3,132	-2,784	1,288	4,173
1,500	0,6110	-0,1333	2,832	-2,571	1,328	4,276
1,600	0,5428	-0,1223	2,755	-2,380	1,365	4,372
1,700	0,4868	-0,1128	2,588	-2,233	1,400	4,461
1,800	0,4401	-0,1047	2,457	-2,087	1,434	4,544
1,800	0,4006	-0,0876	2,331	-1,877	1,466	4,622
2,000	0,3668	-0,0813	2,216	-1,871	1,488	4,686
2,100	0,3380	-0,0857	2,112	-1,777	1,528	4,764
2,200	0,3128	-0,0808	2,017	-1,682	1,557	4,828
2,300	0,2808	-0,0763	1,830	-1,616	1,586	4,381
2,400	0,2716	-0,0723	1,850	-1,547	1,613	4,848
2,500	0,2545	-0,0687	1,776	-1,484	1,640	5,004
2,600	0,2383	-0,0654	1,708	-1,427	1,666	5,056
2,700	0,2257	-0,0624	1,644	-1,375	1,681	5,105
2,800	0,2135	-0,0586	1,585	-1,326	1,716	5,152
2,800	0,2024	-0,0571	1,530	-1,282	1,738	5,187
3,000	0,1824	-0,0548	1,478	-1,241	1,763	5,240
3,100	0,1833	-0,0526	1,430	-1,202	1,785	5,280
3,200	0,1750	-0,0506	1,385	-1,167	1,807	5,318
3,300	0,1674	-0,0487	1,342	-1,134	1,828	5,356
3,400	0,1604	-0,0470	1,302	-1,102	1,850	5,382
3,500	0,1538	-0,0454	1,264	-1,073	1,871	5,426
3,600	0,1430	-0,0438	1,228	-1,046	1,881	5,458
3,700	0,1425	-0,0425	1,183	-1,020	1,811	5,488
3,800	0,1374	-0,0411	1,161	-0,886	1,830	5,518
3,800	0,1326	-0,0388	1,130	-0,873	1,848	5,548
4,000	0,1282	-0,0387	1,101	-0,852	1,868	5,575
4,100	0,1240	-0,0376	1,073	-0,831	1,886	5,602
4,200	0,1202	-0,0365	1,047	-0,812	2,004	5,627

Соотношения положительных и отрицательных параметров взрыва можно наблюдать на графиках рис. 2.3. Результаты расчетов на рис. 2.3-2.7 сняты с монитора при работе программы.

Для оценки поражающего действия конкретного аварийного источника следует перейти к размерным переменным.

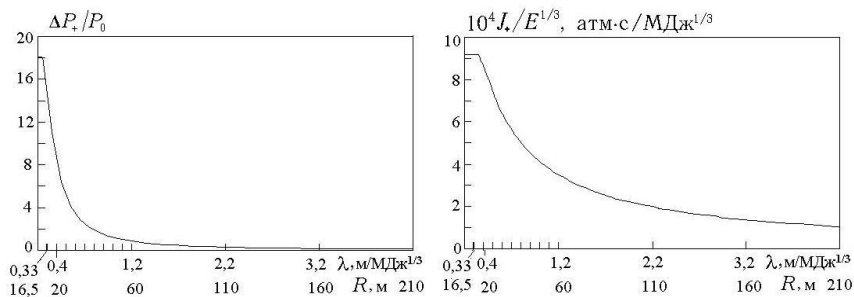


Рис. 2.2. Изменение по координате избыточного давления ΔP_+ на фронте проходящей ударной волны и удельного импульса J_* фазы сжатия при детонации облака испарившегося авиакеросина. Шкала R соответствует энергозапасу $12,32 \cdot 10^4$ МДж

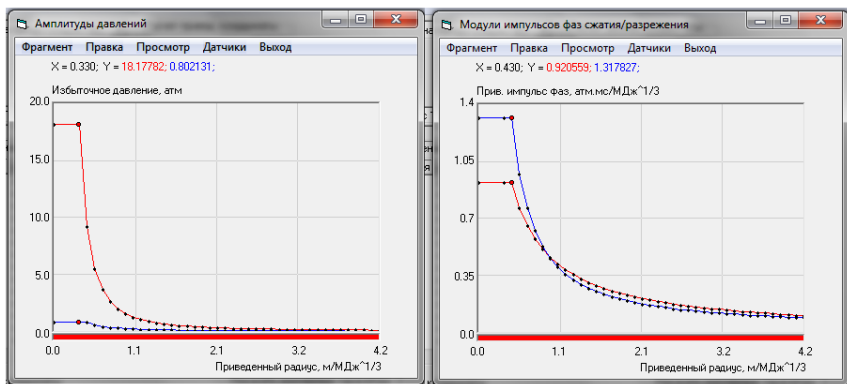


Рис. 2.3. Параметры положительной (красным) и отрицательной (синим) фаз взрыва в энергетических переменных

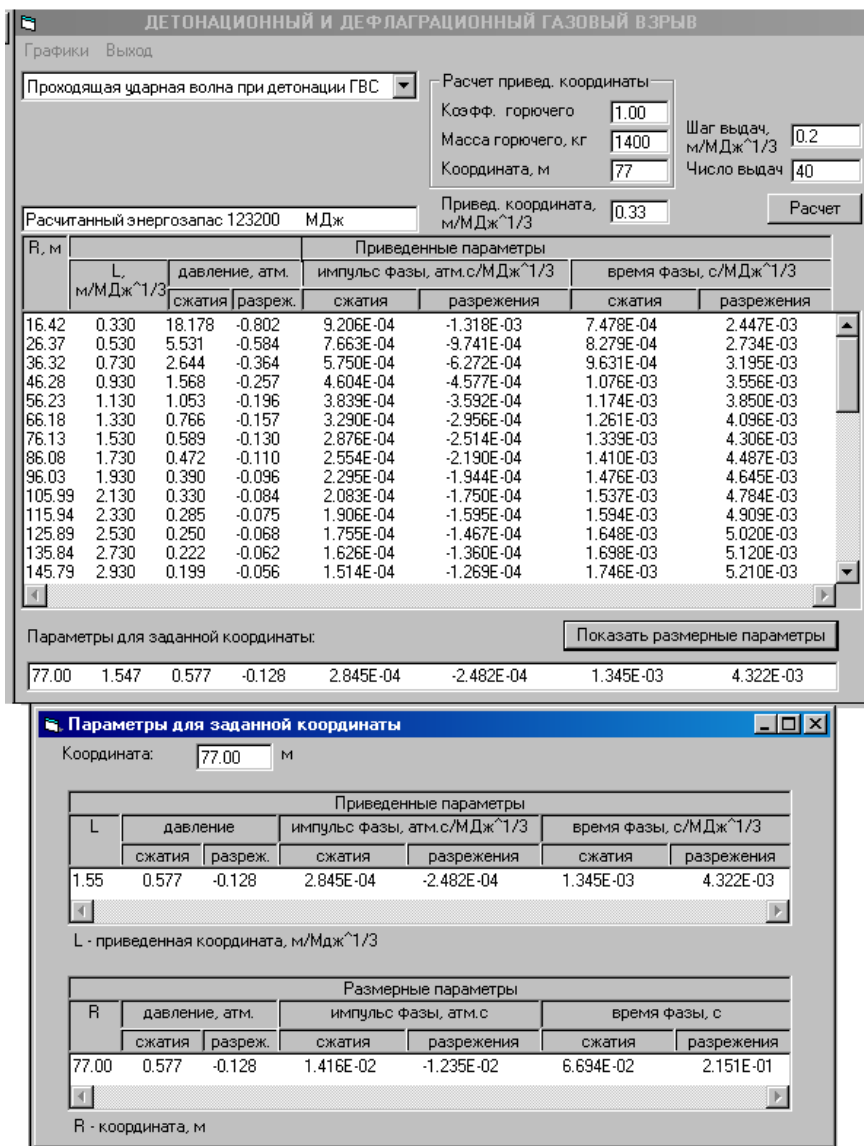


Рис. 2.4. Выдача результатов расчета по программе EXPLOS параметров детонационного взрыва с данными для координаты реципиента $R = 77$ м

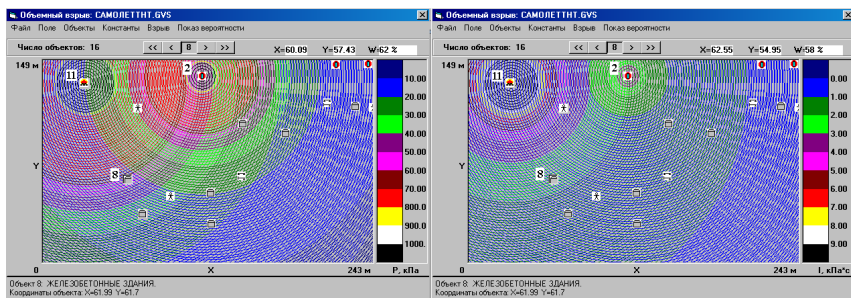


Рис. 2.5. Поля давлений и удельных импульсов на территории в зоне взрывов топлива упавшего самолета (объект 11) и емкости со 150 кг жидкого пропана (объект 2) по эффекту домино; объект 8 – железобетонное здание на дистанции 77 м от взрыва самолета

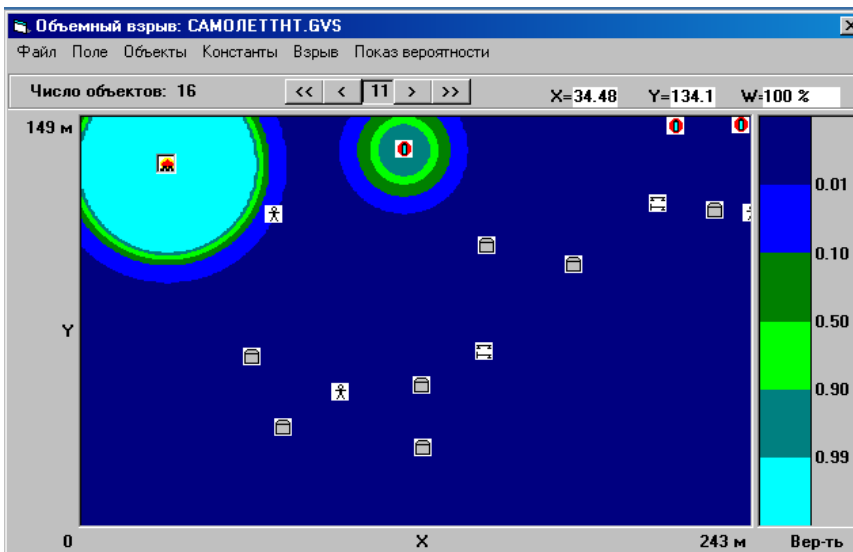


Рис. 2.6. Поля вероятности различной степени поражения людей в зоне взрывов топлива упавшего самолета и емкости со 150 кг жидкого пропана по эффекту домино

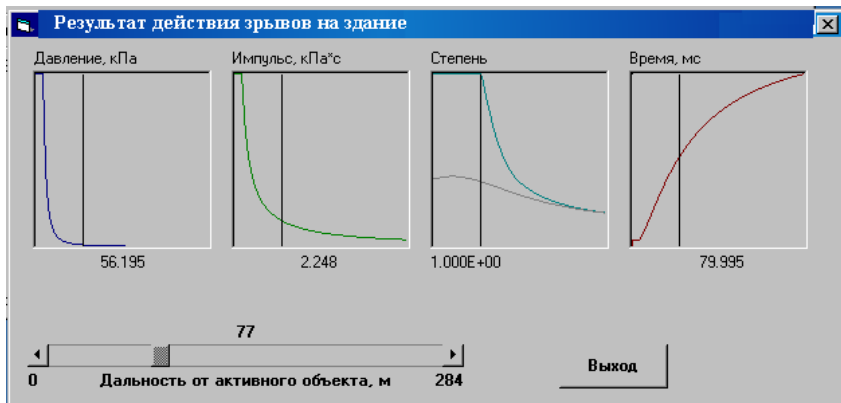


Рис. 2.7. Распределение по координате максимума давления, удельного импульса, времени фазы сжатия и двух степеней повреждения железобетонного многоэтажного здания; по вертикали курсора значения параметров на удалении 77 м здания от самолета

2.2. Расчет параметров взрыва выброса 70 тонн топлива

Определим параметры детонационного взрыва облака испарившегося топлива при аварийном выбросе 70 т авиакеросина. Энергия наземного взрыва (при $\nu = 0,02$) по формуле (2.4) составит $E = 2 \cdot 0,02 \cdot 70 \cdot 10^3 \cdot 44 = 12,32 \cdot 10^4$ МДж. Эффективная масса $M_{\phi} = 2 \cdot 0,02 \cdot 70 = 2,8$ т.

Перейдем к размерной координате: $R = \lambda \sqrt[3]{E} = \lambda \sqrt[3]{12,32 \cdot 10^4} = 50\lambda$ м, и табл. 2.2 дана в диапазоне $R = 0 \div 50 \cdot 4,2 = 210$ м. На рис. 2.1 параметры взрыва приведены по энергетической (λ) и размерной (R) координатам.

На дистанции здания $R = 77$ м коэффициент $\lambda = R/50 = 77/50 = 1,54$; $\xi = 1/\sqrt[3]{12,32 \cdot 10^4} = 0,02$. По табл. 2.2, интерполируем:

$$P_+^* = 0,589; P_-^* = -0,13; J_+^* = 2,85 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{2/3} \cdot \text{с};$$

$$J_-^* = -2,50 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{2/3} \cdot \text{с};$$

$$\tau_+^* = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot \text{МПа}^{-1/3}; \quad \tau_-^* = 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot \text{МПа}^{-1/3}.$$

Переходя к размерным величинам, получим значения параметров ударной волны, действующей на здание:

$$\begin{aligned} \Delta P_+ &= P_+^* \cdot P_0 = 0,058 \text{ МПа}; & \Delta P_- &= P_-^* \cdot P_0 = -0,013 \text{ МПа}; \\ J_+ &= J_+^* / (10\xi) = 2,85 \cdot 10^{-4} / (10 \cdot 0,02) = 0,00143 \text{ МПа} \cdot \text{с}; \\ & & J_- &= -0,00125 \text{ МПа} \cdot \text{с}; \\ \tau_+ &= \tau_+^* / \xi = 1,34 \cdot 10^{-3} / 0,02 = 0,067 \text{ с}; & \tau_- &= 0,216 \text{ с}. \end{aligned}$$

Параметры взрыва в зоне облака ($R \leq 16,4$ м): давление на фронте ударной волны $\Delta P_+ = 1,8$ МПа; давление разрежения $\Delta P_- = -0,08$ МПа; удельный импульс фазы сжатия $J_+ = 4,58$ кПа·с; импульс фазы разрежения $J_- = -6,56$ кПа·с; время фазы сжатия $\tau_+ = 0,0372$ с; время фазы разрежения $\tau_- = 0,122$ с. Выдача расчета, выполненного по программе EXPLOS, показана на рис. 2.4.

Действие взрыва на объекты территории показано на примере реальной застройки одного из поселков Тюменской области, выполненном по программе GPVS. На планах рис. 2.5 и 2.6 показаны зоны на местности с различными уровнями давлений, импульсов и вероятностей поражения людей. На рис. 2.7 (функций параметров взрыва по координате) положением курсора зафиксированы значения параметров на дистанции 77 м анализируемого объекта (здания). Подробная информация действия взрыва на здание приведена на рис. 2.8.

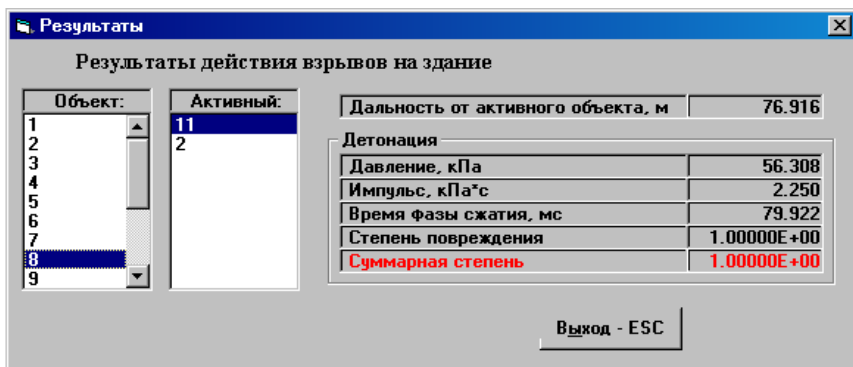


Рис. 2.8. Результаты действия детонационных взрывов на железобетонное многоэтажное здание (объект 8) на удалении 77 м от самолета (объект 11); суммарная степень повреждения – от двух источников (объекты 11 и 2) с учетом эффекта «домино»

3. ДЕФЛАГРАЦИОННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Дефлаграция – процесс развития пламени в газовой смеси от нормального ламинарного горения (со скоростями примерно до 0,5 м/с) до возникновения в ускоряющемся пламени ударного скачка, а затем устойчивой самоподдерживающейся детонации. При дефлаграции возможно как взрывное превращение с образованием взрывной волны с механическим действием, так и возникновение огненного шара с интенсивной термической радиацией. Огненный шар без детонации возникает обычно при горении газозвушной смеси, переобогащенной топливом, а также в некоторых случаях – состава, близкого стехиометрическому.

3.1. Параметры волны сжатия дефлаграционного взрыва

Параметры взрывной волны при дефлаграции определяют в функции параметра λ_d , м/МДж^{1/3}, [10, 18]

$$\lambda_d = R/\sqrt[3]{E} \quad (\lambda_d > \lambda_{d,кр} = 0,73251).$$

Амплитуда избыточного давления ΔP_{def} , МПа:

$$P_{def}^*(\lambda_d) \equiv 10 \Delta P_{def} / P_* = F_p(\lambda_d), \quad F_p(\lambda_d) = 1,788/\lambda_d - 0,65/\lambda_d^2, \\ P_* = (V_\Gamma / C_0)^2 (\sigma - 1) / \sigma. \quad (3.1)$$

Импульс фазы сжатия J_{def} , МПа·с:

$$J_{def}^* \equiv 10 J_{def} / J_* = F_J(\lambda_d), \quad F_J(\lambda_d) = 0,1293/\lambda_d + 0,0464/\lambda_d^2 - 0,025/\lambda_d^3, \\ J_* = \frac{2,154 \cdot V_\Gamma E^{1/3}}{C_0^2} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(1 - 0,4 \frac{V_\Gamma}{C_0} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right), \quad (3.2)$$

где V_Γ – скорость видимого фронта пламени, м/с;

σ – степень расширения продуктов сгорания;

E – энергозапас, МДж;

C_0 – скорость звука в воздухе.

При $C_0 = 340$ м/с и $\sigma = 7$ формулы (3.1) и (3.2) перепишем:

$$P_* = 7,414 \cdot 10^{-6} V_\Gamma^2, \quad (3.3)$$

$$J_* = 1,6 \cdot 10^{-5} V_\Gamma E^{1/3} (1 - 1,0084 \cdot 10^{-3} V_\Gamma), \quad (3.4)$$

и при $V_\Gamma = 200$ м/с $P_* = 0,298$; $J_* = 2,55 \cdot 10^{-3} E^{1/3}$.

При $\lambda_d \leq \lambda_{d,кр}$ параметры взрывной волны постоянны, и в расчете используются те же формулы с подстановкой значения $\lambda_d = \lambda_{d,кр}$. Длительности фазы сжатия определяется по формуле $\tau_{эф} \cong 2J_{def}^* / \Delta P_{def}^*$.

Результаты моделирование дефлаграции при доле участия продукта во взрывном процессе $\nu = 0,1$ по программе EXPLOS [6, 8] в энергетических переменных приведены на рис. 3.1 и в табл. 3.1.

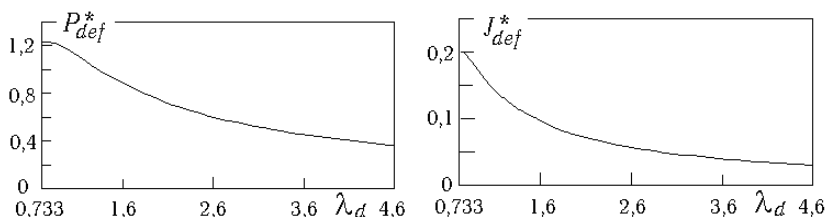


Рис. 3.1. Избыточное давление и удельный импульс фазы сжатия взрывной волны дефлаграционного взрыва в энергетических переменных

Таблица 3.1

Параметры дефлаграционного взрыва в энергетических переменных

λ_d	P_{def}^*	$10^2 J_{def}^*$	λ_d	P_{def}^*	$10^2 J_{def}^*$
0,733	1,2295	18,838	2,700	0,5731	5,288
0,800	1,2194	18,530	2,800	0,5557	5,086
0,900	1,1842	16,666	2,800	0,5393	4,808
1,000	1,1380	15,070	3,000	0,5238	4,733
1,100	1,0883	13,711	3,100	0,5091	4,570
1,200	1,0386	12,550	3,200	0,4953	4,417
1,300	0,8808	11,554	3,300	0,4821	4,275
1,400	0,8455	10,682	3,400	0,4697	4,141
1,500	0,8031	9,941	3,500	0,4578	4,015
1,600	0,8636	8,283	3,600	0,4465	3,886
1,700	0,8268	8,703	3,700	0,4358	3,784
1,800	0,7827	8,187	3,800	0,4255	3,678
1,900	0,7610	7,726	3,800	0,4157	3,578
2,000	0,7315	7,313	4,000	0,4064	3,483
2,100	0,7040	6,838	4,100	0,3874	3,383
2,200	0,6784	6,601	4,200	0,3888	3,308

Окончание табл. 3.1

λ_d	P_{def}^*	$10^2 J_{def}^*$	λ_d	P_{def}^*	$10^2 J_{def}^*$
2,300	0,6545	6,283	4,300	0,3807	3,226
2,400	0,6322	6,012	4,400	0,3728	3,148
2,500	0,6112	5,754	4,500	0,3652	3,075
2,600	0,5815	5,517	4,600	0,3580	3,004

Пример. Определение параметров дефлаграционного взрыва облака испарившегося топлива при аварийном выбросе 70 т авиакеросина при $v = 0,1$ и $V_T = 200$ м/с.

Расчетная масса топлива $M = 0,1 \cdot 70 = 7$ т. Энергия наземного взрыва удваивается и по формуле (2.4) составит $E = 2 \cdot 0,1 \cdot 70 \cdot 10^3 \cdot 44 = 61,6 \cdot 10^4$ МДж; $J_* = 2,55 \cdot 10^{-3} E^{1/3} = 0,217$;

$R = \lambda_d \sqrt[3]{E} = \lambda_d \sqrt[3]{61,6 \cdot 10^4} = 85,09 \lambda_d$ м. На дистанции железобетонного здания $R = 77$ м коэффициент $\lambda_d = R / 85,09 = 0,9049$ м/МПа^{1/3}, и по табл.3.1 $P_{def}^* = 1,18$; $J_{def}^* = 0,166$. Параметры взрывной волны:

$\Delta P_{def} = 0,1 P_{def}^* \cdot P_* = 0,0351$ МПа; $J_{def} = 0,1 J_{def}^* \cdot J_* = 3,60 \cdot 10^{-3}$ МПа·с.

В пределах облака $R \leq 62$ м $\Delta P_{def} = 0,0364$ МПа, $J_{def} = 4,33 \cdot 10^{-3}$ МПа·с.

Параметры взрывной волны по программе EXPLOS в технической системе единиц приведены на рис. 3.2 и 3.3, снятых с монитора с обозначениями: $L - \lambda_d$; $P_{привед.} - P_{def}^*$; $I_{привед.} - J_{def}^*$.

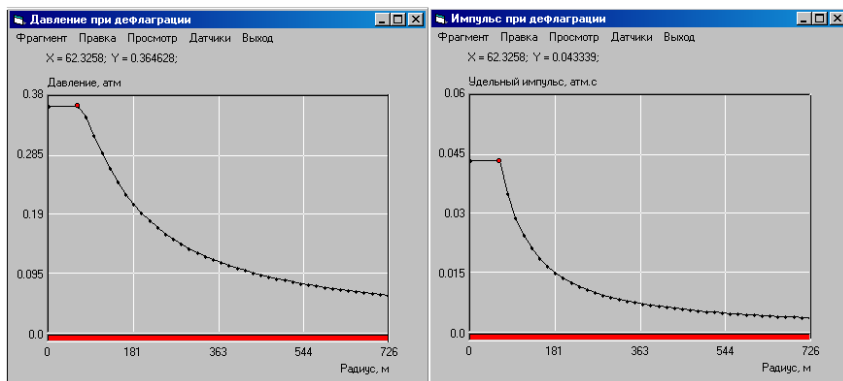


Рис. 3.2. Избыточное давление и удельный импульс фазы сжатия взрывной волны дефлаграционного взрыва в размерных переменных

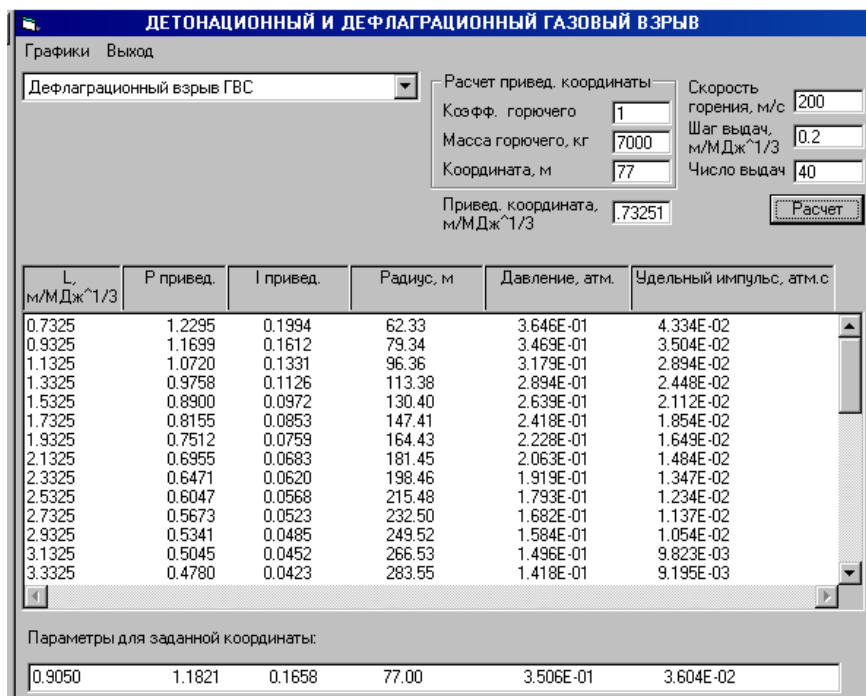


Рис. 3.3. Параметры дефлаграционного взрыва 70 т авиакеросина (расчетная масса 7 т) по координате и в месте расположения железобетонного здания на радиусе 77 м

3.2. Тепловые параметры огненного шара при дефлаграции

Воспламеняющее и поражающее действие огненного шара определяется параметрами его теплового излучения [6–9, 12–16]: величиной теплового потока и импульсом теплового излучения (без удвоения расчетной массы топлива). Для анализа использованы соотношения методик для огненного шара, образуемого от сгорания газозвушных смесей при выбросах сжиженного нефтяного газа из емкостей (Dow Chemical, США).

Диаметр $D = 2R_s$, м, и время t_s , с, существования огненного шара от сгорания газозвушной смеси с массой топлива M , кг:

$$D = 4,60 \sqrt[3]{M}, \quad t_s = 0,357 \sqrt[3]{M}.$$

Интенсивность излучения q , кВт/м², определяется по формуле, аналогичной (1.4):

$$q = \varepsilon \cdot F_k T_p,$$

$$F_k = R_s^2 R / \sqrt{(R_s^2 + R^2)^3} \equiv 2k / \sqrt{(k+4)^3},$$

$$k = (2R_s/R)^2,$$

$$T_p = 1 - 0,058 \ln R \quad (R > 2R_s = D),$$

где $\varepsilon \sim 200\text{--}270$ кВт/м² – мощность поверхностной эмиссии огненного шара;

F_k – коэффициент, учитывающий фактор угла падения;

T_p – проводимость воздуха;

R – расстояние по горизонтали от центра шара радиусом R_s .

Доза теплового излучения Q , кДж/м²:

$$Q = q t_s.$$

При $\varepsilon = 270$ кВт/м² формулы для потока излучения $q = 540 T_p \cdot k / \sqrt{(k+4)^3}$, и импульса $Q^* = Q / \sqrt[3]{M}$

$$Q^* = 192,8 T_p \cdot k / \sqrt{(k+4)^3}.$$

Расчетный алгоритм реализован в программе EXPLOS. Зависимость импульса теплового излучения от расстояния до центра огненного шара в энергетических переменных при $T_p = 1$ (без учета поправки на проводимость воздуха) приведена в табл. 3.2, в размерных переменных – на рис. 3.4 и 3.5 с данными на расстоянии 77 м положения железобетонного здания.

Таблица 3.2

Зависимость импульса теплового излучения Q^*
от относительного расстояния R/D
до центра огненного шара

R/D	1	1,2	1,5	2	5
Q^* , кДж/(м ² ·кг ^{1/3})	17,24	13,16	9,14	5,50	0,95

На радиусе огненного шара $q = 75,8 \text{ кВт/м}^2$, $Q = 410,8 \text{ кДж/м}^2$. На здание действует $q = 31,4 \text{ кВт/м}^2$, $Q = 170,1 \text{ кДж/м}^2$. Поражающее действие теплового излучения можно установить по табл. 3.3 и 3.4.

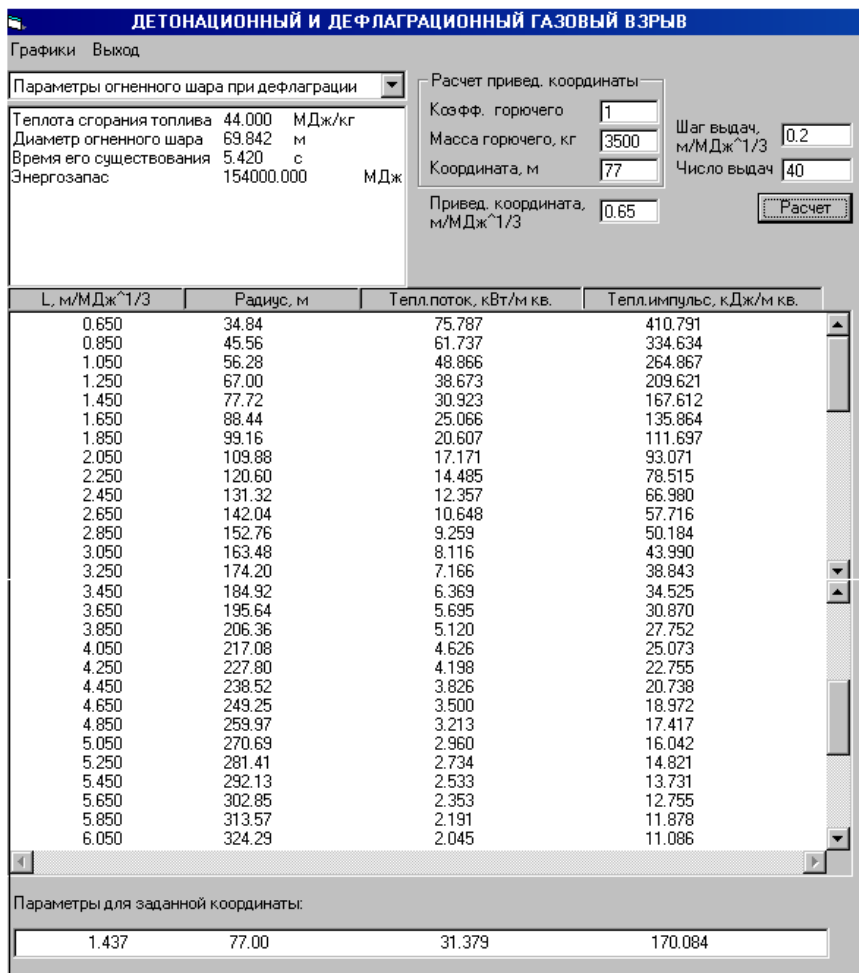


Рис. 3.4. Распределение параметров огненного шара при дефлаграции: тепловой поток и тепловой импульс (доза).

Значение массы 3500 кг введено для компенсации его удвоения в программе

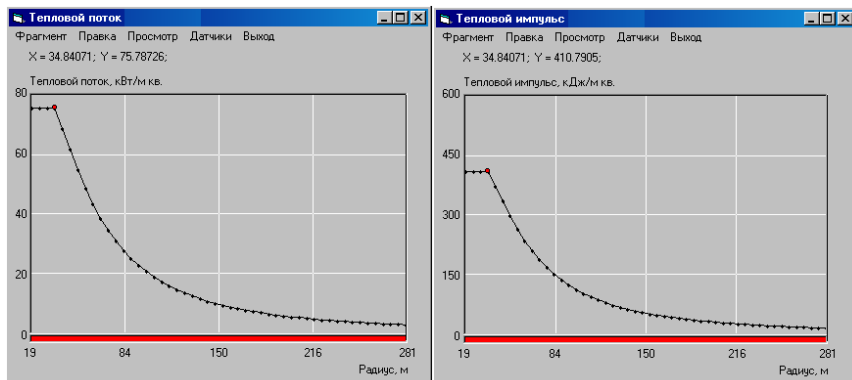


Рис. 3.5. Тепловой поток и тепловой импульс огненного шара при дефлаграции в размерных переменных

Таблица 3.3

Предельные значения импульса (дозы) теплового излучения при действии радиации огненного шара на человека

Поражение	Доза, МДж/м ²
Ожог 1-й степени	0,12
Ожог 2-й степени	0,22
Ожог 3-й степени	0,32

Таблица 3.4

Импульсы теплового излучения, МДж/м², длительностью τ , вызывающие воспламенение материалов

Материал	τ , с			
	1,56	3,16	8,71	24,0
Древесина сухая (сосна)	0,58	0,67	0,88	1,00
Доски после распиловки (сосна, ель)	1,67	1,76	1,88	2,10
Доски, окрашенные в темный цвет	0,21	0,25	0,33	0,42
Кровля мягкая (толь, рубероид)	0,54	0,59	0,67	0,84
Черепица красная (оплавленная)	0,84	1,05	1,26	1,67
Стружка, солома, сено, бумага темная	0,12	0,17	0,21	0,25
Ткань вязкая черная	0,04	0,05	0,08	0,09
Ткань хлопчатобумажная коричневая	0,29	0,33	0,42	0,50
Сукно серое, брезент, кожа коричневая	0,62	0,07	0,84	1,26

4. СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ УДАРА

Приведен алгоритм прогнозирования сейсмических эффектов удара о земную поверхность падающего при аварии самолета, реализованный в программе KOSMOS [1, 2]. Результаты моделирования аварийных событий позволяют прогнозировать последствия падения самолета с произвольными исходными данными: по взлетной массе и величине возможного энергозапаса – массы топлива в баках. Действие сеймики на территории проиллюстрировано на примере аварии тяжелого коммерческого самолета.

4.1. Расчет магнитуды и балльности сеймики по параметрам удара

Сейсмическая интенсивность удара самолета (или балльность J) зависит от магнитуды M , связанной с энергией W сейсмического источника и эпицентральной расстоянием R_{Σ} , убывая от эпицентра к периферии. По ранней магнитудной шкале Рихтера магнитуда определяется как десятичный логарифм амплитуды записи сейсмографом с определенными параметрами на твердом грунте в 100 км от эпицентра. При очень больших магнитудах применяют телескопическую шкалу и унифицированную шкалу Гутенберга [19–21].

Полную энергию очага W , эрг, в функции магнитуды определяют по формуле

$$\lg W = \alpha M + B_1,$$

где для сильных источников $\alpha = 1,5$; $B_1 = 12$ и для слабых $\alpha_1 = 1,8$; $B_1 = 11$ (1 Дж = 10^7 эрг).

Сейсмическую интенсивность на поверхности земли оценивают по 12-балльной шкале MSK-64 Медведева-Шпонхойера-Карника и MMSK-86, усовершенствованной Шебалиным в 1986 г.

Далее приведены результаты расчета магнитуды и балльности сеймики по параметрам удара о грунт падающего самолета.

Энергия удара, создающего сейсмические эффекты Q_0 , равна кинетической энергии в момент контакта за вычетом доли энергии расхода образования кратера

$$Q_0 = 1/2 m_0 V_{\Omega}^2,$$

сейсмический эквивалент магнитуды M эффекта удара

$$M = (\lg Q - B_1) / \alpha_1 \quad (Q = 10^7 \cdot Q_0),$$

где $m_0 = K_S \cdot m$ – расчетная масса падающего объекта;

Q – энергия в эргах;

B_1 и α_1 – константы.

Интенсивность сейсмических сотрясений J на конкретной площадке по 12-балльной шкале определяется в зависимости от магнитуды M , эпицентрального расстояния R_3 , км, глубины энергетического источника h , км, и региональных констант a_3 , b_3 и c_3 (по Н. Шебалину, для России $a_3 = 3$; $b_3 = 1,5$ и $c_3 = 3,5$)

$$J = a_3 + b_3 M - c_3 \lg \sqrt{R_3^2 + h^2}.$$

При падении с высоты h скорость удара V_h равна

$$V_h = V_{\text{ГП}} \sqrt{1 - \exp(-2hg / V_{\text{ГП}}^2)},$$

$$V_{\text{ГП}} = \sqrt{2\gamma M_c g / (C_x \rho_B S)},$$

где $V_{\text{ГП}}$ – предельная скорость падения с учетом сопротивления воздуха;

g – ускорение свободного падения;

C_x – аэродинамический коэффициент;

ρ_B – плотность воздуха;

S – миделево сечение летящего тела.

При падении с высоты h скорость удара равна

$$V_x = V_{\text{ГП}} \sqrt{1 - \exp(-2hg / V_{\text{ГП}}^2)} = 317 \sqrt{1 - \exp(-2x \cdot 9,81 / 317^2)}.$$

При $x = 6500$ м скорость удара $V_{6,5} = 268,7$ м/с. Максимальная высота полета h_{max} для самолетов данного класса ~ 13 км. При падении с максимальной высоты $x = h_{\text{max}} = 13$ км скорость удара $V_{13} = 304,2$ м/с.

Кинетическая энергия удара

$$G = \frac{1}{2} m V_x^2.$$

При указанных скоростях кинетическая энергия удара соответственно составит:

$$G_{6,5} = 0,5 \cdot 4,0 \cdot 10^5 \cdot 268,7^2 = 14440 \text{ МДж}, \quad G_{13} = 18507 \text{ МДж}.$$

Напомним, что без учета сопротивления воздуха при падении с высоты h скорость удара $v = \sqrt{2gh}$, то есть при $h \sim 0,5 h_{\text{max}} = 6,5$ км скорость удара будет равна $v_{6,5} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 6500} = 357$ /с.

4.2. Расчет сейсмике удара самолета массой 400 тонн

Расчет сейсмике проведен по программе KOSMOS для удара о землю самолета массой 400 тонн с высоты 13 км. Получены следующие результаты: скорость удара 304,2 м/с, кинетическая энергия $1,85 \cdot 10^4$ МДж, магнитуда 3,48. Зависимость сейсмической интенсивности J от расстояния r приведена в табл. 4.1.

Из таблицы следует, что сейсмическая опасность для сооружений характеризуется зоной с радиусом до 3 км с интенсивностью более 7 баллов.

Таблица 4.1

Сейсмический эффект удара самолета о землю

r, км	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
J, балл	9,3	8,2	7,2	6,6	6,1	5,8	5,5	5,3	5,1	4,9	4,7

Выводы

Рассмотрены возможные сценарии последствий аварийного падения самолета, методы и программные средства оценки параметров поражающих факторов возникновения пожара, детонационного или дефлаграционного взрывов и огненного шара, а также сейсмических эффектов. Выполнено моделирование аварийных вариантов на примере аварии тяжелого коммерческого самолета. Количественные результаты анализа позволяют прогнозировать последствия аварии на контролируемой территории.

Библиографический список

1. Котляревский В.А., Ларионов В.И. Сейсмическая опасность падения астероидов на земную поверхность. // Электронный журнал «Наука и безопасность», март 2012, № 3(3). С. 159–176. URL:<http://www.art-atis.com>.
2. Александров А.А., Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Астероидная уязвимость Земли. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение», 2013, № 2(91). С. 56–83.
3. Октябрьский Р.Д. Управление риском в системах жизнеобеспечения городской застройки. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2014.

4. Котляревский В.А. Параметры тепловой радиации пожара пролива углеводородов. Программа FIRE. // Безопасность России. Безопасность строительного комплекса. – М.: МГОФ «ЗНАНИЕ», 2012. С. 732–735.
5. Котляревский В.А. Параметры газовых взрывов // Там же. С. 567–573.
6. Котляревский В.А. Объемные взрывы газовых облаков в атмосфере при выбросе топлив. // В.А. Котляревский, В.И. Ларионов, С.П. Сущев. Энциклопедия безопасности. Строительство. Промышленность. Экология. Том 1: Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия. / Под ред. В. А. Котляревского. – М.: НАУКА, 2005. С. 410–489.
7. Котляревский В.А. Прогнозирование последствий аварий на объектах нефтегазодобычи. // Безопасность России. Безопасность строительного комплекса. – М.: МГОФ «Знание», 2012. С. 739–750.
8. Котляревский В.А. Программная поддержка разработки деклараций промышленной безопасности. // Там же. С. 750–765.
9. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. ГОСТ Р 12.3.047-2012.
10. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. // Сб. методик № 1. Госгортехнадзор России. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 1999. С. 85–112.
11. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Сб. документов. Серия 27. Вып.2. Госгортехнадзор России. М.: НТЦ «Промышленная безопасность». 2001.
12. Pietersen C.M. Consequences of accidental releases of hazardous material. // J. Loss Prev. Process Ind., 1990, Vol. 3, January. P. 136–141.
13. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. – М.: Мир. 1986.
14. Топлива для реактивных двигателей. ТУ ГОСТ 10227-86 (ИУС 5-6-93). – М.: Стандартиформ, 2008.
15. Brossard J., Leyer J.C., Desbordes D., Saint Clouds J.P., Hendrickx S., Garnier J.L., Lannoy A., Perrot J. Air blast unconfined gaseous detonations. // Prog. Astron. Aeron., 1984. 94. 556.
16. Desbordes D., Manson N., Brossard J. Explosion dans l'air de charges spheriques non confenees de melanges reactifs gazeux. // Acta Astronautica. 1978. 5. 1009.
17. Methods for the determination of possible damage. Green book CPR 16E, 1989.
18. Woolfolk R.W., Ablow C.M. Blast waves from non-ideal explosions. Proc. of conf. on mechanisms of explosion and blast waves. Feltman research laboratory, Picatinny Arsenal. – Dover, 1973, No 1. P. 42.

19. Котляревский В.А., Ларионов В.И., Сушев С.П. Землетрясения. // Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология. Том 3. Сейсмостойкость и теплозащита сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 2010. С. 2–24.
20. Мартемьянов А.И. Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1985.
21. Медведев С. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962.