

УДК 539.3

Е. В. Толок

ОСКОЛОЧНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЗДАНИЯ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ

Рассмотрена математическая модель определения возможности осколочного поражения промышленных зданий (пробитие) при аварийных взрывах.

Ключевые слова: осколок, аэродинамическое сопротивление, пробитие, промышленное здание, аварийный взрыв.

Введение. К основным аварийным ситуациям в химической и нефте-химической промышленности относятся ударно-волновое и осколочное поражение людей и промышленных объектов в результате взрывов газов, пыли, жидких, твердых и вязкопластичных веществ в оборудовании или на открытом пространстве. Примеры подобных аварий описаны в работах [1, 3, 6].

При взрывных явлениях возникает необходимость оценить поражающий эффект осколков, определяемый дальностью полета осколков и пробивной способностью осколка различных преград [1].

При пробитии промышленного здания возможно поражение находящегося в здании персонала, емкостного оборудования, содержащего опасные вещества, а также средств управления технологическим процессом (КИПиА), что приведет к развитию аварии по принципу «домино» [1, 3].

Материалы и результаты исследований. Рассматривается движение твердого тела (осколка), не подверженного действию подъемной силы в вертикальной плоскости под действием силы тяжести и аэродинамической силы сопротивления. Необходимо определить возможность сквозного пробития осколком промышленного здания, находящегося в зоне максимально-го разлета осколка.

В декартовой системе координат (X, Y) , уравнения движения центра тяжести осколка и начальные условия имеют вид [4]:

$$mx''(t) = -px'(t)\sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2}; \quad (1)$$

$$my''(t) = -py'(t)\sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2}, \quad (2)$$

$$x(0) = x_0, y(0) = y_0, x'(0) = W_0 \cos \alpha, y'(0) = W_0 \sin \alpha, \quad (3)$$

где m – масса осколка, кг; p – коэффициент аэродинамического сопротивления, кг/м; x_0, y_0 – координаты центра тяжести осколка в начальный момент времени, м; W_0 – начальная скорость осколка, м/с; α – угол наклона вектора начальной скорости осколка к оси X , град.

Величина p определяется выражением

$$p = 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot S, \quad (4)$$

где ρ_{air} – плотность воздуха, $кг/м^3$; S – миделево сечение осколка, $м^2$; C_D – коэффициент силы сопротивления.

Система дифференциальных уравнений (1)–(3) является нелинейной, решение этой системы возможно только численно. В работе [4] приведен численный метод решения системы (1)–(3).

Условия пробития осколком металлической пластины при нормальном ударе.

Реальный процесс пробития преграды сопряжен с возникновением и разлетом новых фрагментов, нагревом и оплавлением места внедрения ударника [1, 5, 7]. Поэтому для практических целей пробитие в конкретных случаях может быть рассмотрено на основе эмпирических зависимостей, полученных в результате большого числа экспериментальных данных.

В работе [1] приведен метод определения возможности сквозного пробития металлической пластины ударником (осколком) плохообтекаемой формы, близкой к сферической. Скорость ударника направлена по нормали к поверхности мишени.

Данный метод определяется аналитическим выражением [1]

$$\frac{\rho W_{50}}{\sqrt{\sigma_{yM} \rho_M}} = \frac{k}{R} \delta_M, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала осколка, $кг/м^3$; W_{50} – скорость осколка, при которой вероятность сквозного пробития составляет 50 %, $м/с$; σ_{yM} – статический предел текучести материала пластины, $Па$; ρ_M – плотность материала пластины, $кг/м^3$; δ_M – толщина пластины, $м$; R – эффективный радиус осколка, $м$; k – коэффициент пропорциональности ($k = 3,61$).

Эффективный радиус осколка R ($м$) определяется выражением:

$$R = \left(\frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где m – масса осколка, $кг$.

Условия пробития осколком железобетонной стенки при нормальном ударе. В работе [1] для экспресс-оценки эффективности железобетонных плит в качестве защиты от проникающих осколков предлагается использовать формулу (5) при дополнительном условии равнопрочности стального листа из мягкой стали, например марки Ст. 3 и железобетонной плиты. Условие равнопрочности имеет вид:

$$\delta_{Cm3} \cdot \sigma_{Cm3} = \delta_{bM} \cdot R_{bM}, \quad (7)$$

где δ_{Cm3} – толщина металлической пластины, $м$; δ_{bM} – толщина железобетонной плиты, $м$; σ_{Cm3} – предел текучести стали марки Ст. 3, $Па$

($\sigma_{Cm3} = 250 \text{ МПа}$ [9]); R_{bM} – предел прочности бетона соответствующей марки, Па.

Тогда в соответствии с формулами (5), (7) возможность сквозного пробития железобетонной стенки ударником (осколком) плохообтекаемой формы, близкой к сферической определяется выражением [1]:

$$\frac{\rho W_{50}}{\sqrt{\sigma_{CT3} \rho_{CT3}}} = \frac{k \cdot \delta_{bM} \cdot R_{bM}}{R \cdot \sigma_{CT3}}, \quad (8)$$

где ρ_{Cm3} – плотность стали марки Ст. 3, кг/м^3 .

Условия пробития осколком мишени произвольной конфигурации при косом ударе. При консервативном допущении выше приведенные методы определения возможности пробития при нормальном соударении осколка с плоской мишенью (преградой) можно применить к решению задачи о пробитии мишени другой конфигурации, а также при ударе осколка по мишени, когда вектор скорости не параллелен нормали к поверхности мишени в точке удара (косой удар) [1].

Для того чтобы можно было воспользоваться формулой (8) для определения возможности пробития, необходимо найти проекцию вектора скорости осколка в точке удара M на единичную нормаль к поверхности мишени, используя известное свойство скалярного произведения векторов:

$$W_n = (\vec{W}; \vec{n}). \quad (9)$$

Компоненты вектора скорости в конце траектории определяются в соответствии с численным методом решения системы (1)–(3), изложенным в работе [4].

Численный пример определения возможности сквозного пробития промышленного здания. Проиллюстрируем выше изложенный метод определения возможности сквозного пробития мишени на примере пробития железобетонного здания осколком при «лобовом» ударе (плоскость, в которой находится траектория полета осколка, перпендикулярна ближайшей вертикальной поверхности здания, рис. 1).

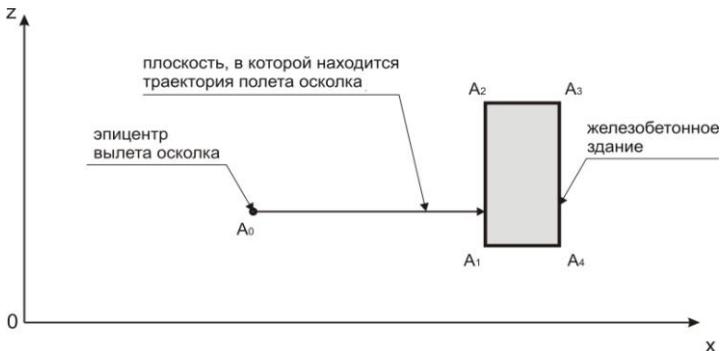


Рис. 1 – «Лобовой» удар осколком по железобетонному зданию (вид в плане)

Необходимо определить возможность сквозного пробития железобетонных навесных стеновых панелей и железобетонных стропильных панелей покрытия [2–8].

Осколок имеет форму куба, материал – сталь.

Исходные данные для расчета:

Параметры для расчета траектории осколка:

- начальная скорость осколка $W_0 = 65 \text{ м/с}$;
- координаты центра тяжести осколка в начальный момент времени $x_0 = 0 \text{ м}$, $y_0 = 0 \text{ м}$;
- коэффициент силы сопротивления осколка $C_D = 1,05$;
- сторона куба $a = 0,05 \text{ м}$; масса осколка $m = 0,98 \text{ кг}$ (соответствует плотности материала стали 7800 кг/м^3);
- плотность воздуха $\rho_{air} = 1,293 \text{ кг/м}^3$ [1];
- шаг по времени $\tau = 0,01 \text{ с}$.

Параметры железобетонного здания:

- расстояния от эпицентра вылета осколка до здания $L_1 = 100 \text{ м}$ (рис. 2);
- длина здания $L_2 = 60 \text{ м}$ (рис. 2);
- высота здания $H = 12 \text{ м}$ (рис. 2);
- толщина стеновых панелей $h_1 = 0,3 \text{ м}$;
- толщина стропильных панелей покрытия $h_2 = 0,025 \text{ м}$;
- предел прочности бетона стеновых панелей $R_{b1} = 2,4 \text{ МПа}$ (марка бетона В2,5 [10]);
- предел прочности бетона стропильных плит покрытия $R_{b2} = 18,5 \text{ МПа}$ (марка бетона В25 [10]).

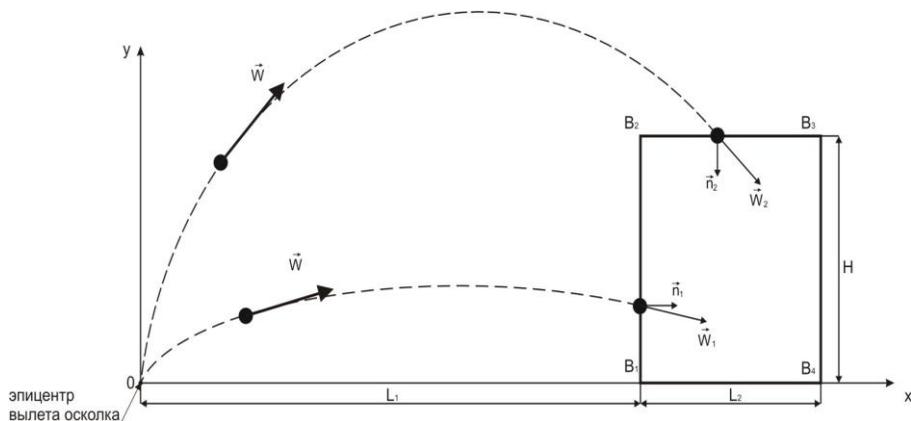


Рис. 2 – Определение проекции скорости осколка в конце траектории на нормаль к поверхности объекта W_n (в момент соударения осколка с объектом)

Решение:

В соответствии с численным методом решения системы (1)–(3), изложенным в работе [4] определяем:

- проекцию скорости осколка в конце траектории на нормаль к ближайшей вертикальной поверхности объекта W_{n1} как функцию угла α ;
- проекцию скорости осколка в конце траектории на нормаль к горизонтальной поверхности объекта W_{n2} как функцию угла α .

Численный анализ функций $W_{n1}(\alpha)$, $W_{n2}(\alpha)$ показывает следующее:

- максимальное значение функции $W_{n1}(\alpha)$ соответствует углу $\alpha_{1\max} = 7,64^\circ$ и равно $W_{n1\max} = W_n(\alpha_{1\max}) = 54,03 \text{ м/с}$;
- максимальное значение функции $W_{n2}(\alpha)$ соответствует углу $\alpha_{2\max} = 79,27^\circ$ и равно $W_{n2\max} = W_n(\alpha_{2\max}) = 47,00 \text{ м/с}$.

В соответствии с формулой (8) нормальная составляющая скорости осколка, при которой вероятность сквозного пробития составляет 50 %:

- для стеновых панелей $W_{n1,50} = 57,70 \text{ м/с}$;
- для панелей покрытия $W_{n2,50} = 37,06 \text{ м/с}$.

Таким образом: для стеновой панели условие пробития не выполняется; для панели покрытия условие пробития выполняется.

Выводы. Данный метод позволяет оценить возможности осколочного пробития осколком промышленных зданий и возникновения эффекта «домино» (возможность поражения людей, емкостного оборудования и средств КИПиА, находящихся в здании [1, 3]).

С целью предотвращения эффекта «домино» данный метод позволяет рассчитать дополнительные навесные панели здания в случае возможности пробития осколками основных панелей при аварийных взрывах.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на:

а) разработку вычислительных алгоритмов метода определения возможности осколочного поражения (пробития) промышленного здания с учетом наличия промежуточных мишеней между эпицентром вылета осколка и рассматриваемым объектом;

б) разработку вычислительных алгоритмов метода определения остаточной скорости осколка после пробития навесных стеновых панелей здания и панелей покрытия здания с целью определения возможности поражения людей, емкостного оборудования и средств КИПиА, находящихся в здании;

в) разработку вычислительных алгоритмов метода определения возможности пробития железобетонных панелей промышленного здания с учетом наличия арматурных стержней;

г) разработку инженерных решений, направленных на усиление навесных железобетонных панелей промышленного здания в случае возможности их пробития осколками при аварийных взрывах (дополнительные панели, металлические сетки и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Бейкер У.** Взрывные явления. Оценка и их последствия. Книга 2 / У. Бейкер [и др.]; пер с англ. – М.: Мир, 1986. – 384 с.
2. **Байков В. Н.** Железобетонные конструкции. Общий курс. Учебник для вузов / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М.: АСВ, 2010. – 568 с.
3. **Бесчастнов М. В.** Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М. В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
4. **Грановский Э. А.** Анализ факторов, определяющих стойкость техники в аварийных ситуациях / Э. А. Грановский, Е. В. Толлок, Ю. С. Воробьев, М. В. Чернобрышко // Вестник ХНТУСГ. – 2009. – Вып. 80. – С. 300–304.
5. **Герасимов А. В.** Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / А. В. Герасимов, В. Н. Барашков, В. П. Глазырин; ред. А. В. Герасимова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 572 с.
6. **Маршалл В.** Основные опасности химических производств / В. Маршалл; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 671 с.
7. **Орленко Л. П.** Физика взрыва и удара / Орленко Л. П. – М.: Физматлит, 2006. – 304 с.
8. **Попов Н. Н.** Проектирование и расчет железобетонных и каменных конструкций. Учебник для вузов / Н. Н. Попов, А. В. Забегаев. – М.: Высшая школа, 1989. – 436 с.
9. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
10. СНиП 2.03.01–84. Бетонные и железобетонные конструкции.

С. В. Толлок

ОСКОЛКОВА ДІЯ НА ПРОМИСЛОВІ БУДІВЛІ ПРИ АВАРІЙНИХ ВИБУХАХ

Розглянуто математичну модель визначення можливості осколкового поразки промислових будівель (пробиття) при аварійних вибухах.

Ключові слова: *осколок, аеродинамічний опір, пробиття, промислова будівля, аварійний вибух.*

E. W. Tolok

FRAGMENTATION EFFECTS ON INDUSTRY BUILDINGS AT EMERGENCY EXPLOSIONS

Mathematical model for determining the possibility of fragmentation damage of industrial buildings (penetration) at emergency explosions is regarded.

Keywords: *fragment, drag, penetration, industrial building, emergency explosion.*

The major emergencies in chemical and petrochemical industries include shock wave and fragmental injury of people and industrial facilities as a result of accidental explosions. Examples of such accidents are described in [1, 3, 6]. When explosive events it becomes necessary to evaluate the effect of striking the fragments, defined flight range of the fragments and the penetrating ability of the fragment various obstacles [1]. Penetration of tank equipment as a result of fragmentation impact can lead to further development of the accident by "domino effect" [1, 3].

Consider the motion of a fragment, not subjected to action of the lifting force, in vertical plane due to gravity and aerodynamic drag force. Necessary to determine the possibility of penetration through a splinter of storage equipment, located

in the zone of maximum expansion of the fragment. The presence of intermediate targets between the epicenter fragment emission and the object under consideration is not considered as a conservative assumption.

In Cartesian coordinate system (X, Y) the motion equations of gravity center of the fragment and the initial conditions are [4]:

$$mx''(t) = -px'(t)\sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2}; \quad (1)$$

$$my''(t) = -py'(t)\sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2}; \quad (2)$$

$$x(0) = x_0, y(0) = y_0, x'(0) = W_0 \cos \alpha, y'(0) = W_0 \sin \alpha, \quad (3)$$

where m is mass of the fragment, kg ; p is drag coefficient, kg/m ; x_0, y_0 are the coordinates of gravity center of the fragment at the initial time, m ; W_0 – the initial fragment velocity, m/s ; α – angle of initial velocity vector fragment to the X , degree.

The value p is defined by the expression [4]

$$p = 0.5 \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot S, \quad (4)$$

where ρ_{air} is air density, kg/m^3 ; S is middle section of the fragment, m^2 ; C_D is drag coefficient.

The system of differential equations (1–3) is non-linear. Solving this system can be only numerical. Numerical method for the solution of (1–3) is in [4].

The actual process of penetration the target is associated with the emergence and dispersal of new fragments, heating and melting of the introduction place of the fragment [1, 5, 7]. Therefore, to determine the penetration conditions is advisable to use empirical methods.

There is Baker's empirical method [1] for determining the conditions for fragment penetration of metal plates at normal impact, based on the determination of the penetration velocity of the fragment. Baker's method determines the penetration possibility for a fragment, the form of which is close to spherical.

According to the Baker's method penetration condition is defined by the expression [1]

$$\frac{\rho W_{50}}{\sqrt{\sigma_{yM} \rho_M}} = \frac{k}{R} \delta_M, \quad (5)$$

where ρ is density of fragment material, kg/m^3 ; W_{50} is fragment velocity at which the probability of through-penetration is 50 %, m/s ; σ_{yM} is static yield stress of plate material, Pa ; ρ_M is density of plate material, kg/m^3 ; δ_M is thickness of the plate, m ; R is effective radius of the fragment m ; k is proportionality constant ($k = 3.61$).

The effective fragment radius is defined by the expression

$$R = \left(\frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

where m is mass of the fragment, kg .

In [1] for the rapid assessment of the effectiveness of reinforced concrete plates as protection from penetrating fragments are encouraged to use the formula (5) with the additional condition of equal strength steel sheet of mild steel, such as the brand of St. 3 and a reinforced concrete plate. The condition of equal strength is

$$\delta_{Cm3} \cdot \sigma_{Cm3} = \delta_{bM} \cdot R_{bM}, \quad (7)$$

where δ_{Cm3} is thickness of metal plate, m ; δ_{bM} is thickness of reinforced concrete plates, m ; σ_{Cm3} is static yield stress of St. 3 brand, Pa ($\sigma_{Cm3} = 250 \text{ MPa}$ [9]); R_{bM} – stress strength of concrete, Pa .

Then, in accordance with formula (5) and (7) the possibility of fragment penetration, the form of which is close to spherical, is given by [1]

$$\frac{\rho W_{50}}{\sqrt{\sigma_{Cr3} \rho_{Cr3}}} = \frac{k \cdot \delta_{bM} \cdot R_{bM}}{R \cdot \sigma_{Cr3}}, \quad (8)$$

where ρ_{Cm3} is the density of St. 3 brand, kg/m^3 .

The conservative assumption of this method can be applied to the problem of penetration the target of complex configuration.

To determine the penetration possibility of a target of complex configuration, it is necessary to find the projection of velocity vector of the fragment at the impact point M on the unit normal to the surface of the target, using the well-known property of the scalar product of vectors

$$W_n = (\vec{W}; \vec{n}). \quad (9)$$

The value of W_n is compared with fragment penetrative rate and the conclusion of the possibility penetration.

Velocity components at the end of the trajectory are determined in accordance with a numerical method for solving the system (1–3), which is described in [4].

For a numerical example of determining the penetration possibility of a reinforced concrete building geometric and strength characteristics of the reinforced concrete panels of the building were taken from [2, 8, 10].

REFERENCES

1. **Baker W.** Explosion Hazards and Evaluation. Book 2. / W. Baker [and others]; translated from english. – M. : Mir, 1986. – 384 p. (in Russian).
2. **Baikov V. N.** Reinforced concrete structures. General course. Textbook for high universities / V. N. Baikov, E. E. Sigalov – M. : AUB, 2010. – 568 p. (in Russian).
3. **Beschastnov M. V.** Industrial explosions. Assessment and prevention / M. V. Beschastnov. – M. : Chemistry, 1991. – 432 p. (in Russian).
4. **Granovsky E. A.** Analysis of the factors that determine the resistance of equipment in emergency situations / [E. A. Granovsky, E. V. Tolok, Yu. S. Vorob'yov, M. V. Chernobryvko] // Bulletin HNTUSG. – 2009. – Is. 80. – P. 300–304. (in Russian).
5. **Gerasimov A. V.** Theoretical and experimental studies of the interaction of a high-speed objects / V. N. Barashkov, A. V. Gerasimov, V. P. Glazyrin; ed. A. V. Gerasimov. – Tomsk: Tomsk University, 2007. – 572 p. (in Russian).
6. **Marshall W.** Major chemical hazards / W. Marshall; translated from english. – M. : Mir, 1989. – 67 p. (in Russian).
7. **Orlenko L. P.** Physics of explosion and shock / L. P. Orlenko. – M.: Fizmatlit, 2006. – 304 p. (in Russian).
8. **Popov N. N.** Design and calculation of reinforced concrete and stone structures. Textbook for universities / N. N. Popov, A. V. Zabegaev. – M. : High school, 1989. – 436 p. (in Russian).
9. GOST 14249–89 Vessels and apparatus. Norms and methods strength calculation (in Russian).
10. SNIP 2.03.01–84. Concrete and reinforced concrete structures (in Russian).

ООО «Научный центр
изучения рисков «РИЗИКОН»,
Северодонецк, Украина

Поступила в редколлегию 18.10.2012