

Расчет динамической нагрузки на перекрытие стартового комплекса при аварийном взрыве

Д.П. Мандрица, доцент кафедры, канд. техн. наук,¹

В.Н. Щельников, научный сотрудник, канд. техн. наук,¹

П.М. Мандрица, старший научный сотрудник,²

¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

²ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (федеральный центр науки и высоких технологий), г. Москва

e-mail: MANDRIZA66@mail.ru

Ключевые слова:

стартовое сооружение,
аварийный взрыв,
импульсная нагрузка,
динамическое давление,
стартовый комплекс.

В работе рассмотрены вопросы определения параметров динамической нагрузки от разрушенной части плиты покрытия при аварийном взрыве на стартовом комплексе. Для оценки параметров динамической нагрузки используется подход, основанный на расчетной оценке параметров импульсной нагрузки контактного взрыва смеси компонентов ракетного топлива. Определены зависимости для оценки параметров динамической нагрузки на перекрытие нижележащего этажа стартового сооружения, получены оценки динамической нагрузки от разрушенной части покрытия стартового сооружения при аварийном взрыве смеси компонентов ракетного топлива. Предлагается метод определения нагрузок и воздействия разрушенной части плиты покрытия на нижележащие конструкции.

1. Введение

Опыт эксплуатации стартового комплекса свидетельствует, что при подготовке и запуске ракет космического назначения могут возникать аварийные ситуации, сопровождающиеся аварийными взрывами (АВ). Воздействие поражающих факторов АВ на стартовое сооружение вызывает изменение прочностных характеристик несущих конструкций, что приводит к снижению или полной потере защитных и эксплуатационных свойств, к выходу из строя специальной техники, оборудования, технологических и технических систем.

Наиболее опасной аварийной ситуацией считается падение ракеты на стартовое сооружение с последующим образованием и взрывом конденсированной взрывчатой смеси компонентов ракетного топлива (КРТ). При подготовке и запуске ракеты космического назначения на стартовом сооружении могут возникать аварийные ситуации, связанные с проливом, растеканием КРТ образованием паро-газовоздушных взрывчатых смесей, приводящие к технологическим аварийным взрывам.

Основным поражающим фактором аварийного взрыва является действие условного заряда из смеси КРТ, которое приводит к разрушению конструкционного материала в области, прилегающей к месту взрыва; отколом тыльной поверхности конструкции покрытия; сквозным пробиванием (продавливанием) конструкции [1–3]. Параметры этого поражающего фактора существенно зависят от формы и геометрических характеристик условного заряда из смеси КРТ. Установлено, что форма взрывчатой смеси, образующейся в процессе растекания, перемешивания и испарения КРТ, представляет собой цилиндр с различным соотношением высоты и радиуса $k = h/r$.

2. Расчет параметров аварии

Разрушение элементов покрытия возможно по двум сценариям. В первом сценарии, если радиус откольной воронки больше суммы толщины конструкции покрытия и половины высоты заряда, происходит откол внутренней поверхности плиты покрытия (рис. 1).

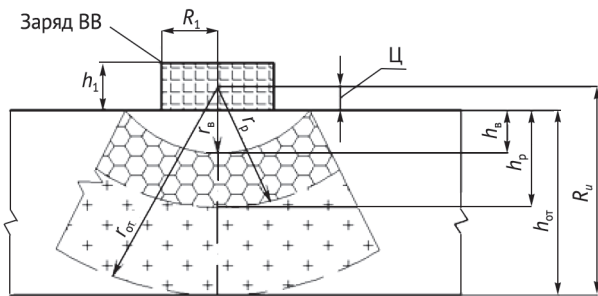


Рис. 1. Схема разрушения плиты покрытия

Глубину воронки разрушения h_b для сосредоточенного заряда взрывчатого вещества (ВВ), имеющего вид цилиндра с высотой $h_1 = 2R_1$, где: h_1 — высота цилиндра; R_1 — радиус цилиндра, можно определить следующим образом:

$$h_b = k_b \sqrt[3]{C_{эф}} - Ц,$$

где: k_b — коэффициент сопротивления материала преграды вытеснению; $C_{эф}$ — тротиловый эквивалент заряда [1–3].

Параметры отколовшейся части бетона определяются по формуле [1, 2]:

$$G_{obl} = (2R_u + h_{ob}) h_{ob}^2 \gamma_b, \text{ Н},$$

где: G_{obl} — вес обломков; R_u — расстояние от центра расчетного заряда до нижней поверхности плиты покрытия

$$R_u = h_{ob} + Ц,$$

где h_{ob} — глубина откольной воронки:

$$h_{ob} = R_u (2,3\gamma_b - 0,6)(1 - \gamma_b), \text{ м}, \quad \gamma_b = m \frac{r_2}{R_u}$$

где: γ_b — объемный вес бетона; m — коэффициент забивки, равный 1 для расчетного случая аварийного взрыва смеси КРТ; r_2 — радиус воронки выброса.

Величина динамической силы S_{obl} , действующей на нижнюю плиту покрытия в результате падения на нее обломков бетона, определяется по формуле [2, 3]:

$$S_{obl} = \frac{G_{obl} U_{obl}}{gt_3}, \text{ Н},$$

где: U_{obl} — средняя скорость падения обломков бетона; t_3 — время нагружения нижней плиты покрытия обломками бетона, ориентировочно определяемое из выражения [2, 3, 4]:

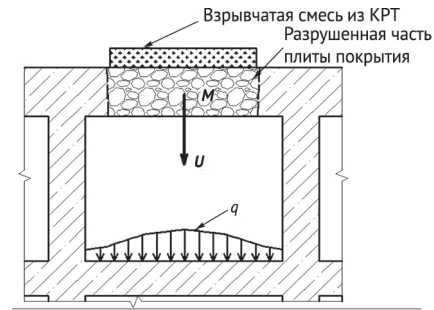


Рис. 2. Схема разрушения несущих конструкций СС при аварийном взрыве

$$t_3 = \frac{h_{ob}}{U_{obl}}, \text{ с.}$$

Площадь заполнения нижней плиты перекрытия обломками бетона имеет форму круга, диаметр которого D_3

$$D_3 = r \sqrt{h_{ob} (2R_u + h_{ob})}, \text{ м.}$$

В случае, если радиус разрушения r_p окажется больше суммы толщины конструкции и половины высоты заряда ВВ, то конструкция покрытия будет продавлена (сценарий 2). Для определения зоны продавливания и параметров продавленной части плиты покрытия рассмотрим приближенный интегральный расчет разрушения прочных плит под действием контактных взрывов ВВ.

В [2] отмечается, что форма продавленной части преграды близка к цилиндру с диаметром, равным диаметру ВВ, и высотой, равной толщине покрытия. Такая форма продавленной части плиты покрытия характерна для взрывов зарядов ВВ с $k = h_3/r_3$ (рис. 2).

В [2, 3] установлено, что полный импульс I при отражении детонационной волны от преграды может быть определен следующим образом:

$$I = \frac{32}{27} A p_n \frac{h_3}{D}, \quad (1)$$

где: A — площадь поперечного сечения заряда; h_3 — высота заряда ВВ; D — скорость детонационной волны; p_n — давление во фронте детонационной волны.

Давление на поверхность несущих конструкций p при отражении от нее детонационной волны определяется в зависимости от времени t [2, 3]:

$$p = \frac{64}{27} p_n \left(\frac{h_3}{Dt} \right)^3. \quad (2)$$

Формула (2) показывает, что давление p на поверхности сооружения падает чрезвычайно резко со временем t . В этом случае импульс сообщается преграде за весьма короткий промежуток времени, равный времени пробега волны разрежения по заряду.

Выражения (1) и (2) справедливы для абсолютно несжимаемой преграды. Для реальных преград следует учитывать истинное максимальное давление, которое возникает на границе раздела сред при отражении. Давление и импульс взрыва при этом существенно зависят от соотношения между плотностью и сжимаемостью продуктов детонации (ПД) и самой среды.

Для сжимаемой преграды зависимость давления p_x на преграду от времени t может быть выражена формулой [5]

$$p_x = \frac{64}{27} p_n \left(\frac{h_3}{Dt} \right)^3 \frac{(1-w_0)^3}{\left\{ 1-w_0 \left[1 - \left(\frac{h_3}{Dt} \right)^{\beta-1} \right] \right\}^{3\beta(\beta-1)}}, \quad (3)$$

где: $w_0 = \frac{u_0}{D}$;

u_0 — начальная скорость границы раздела ПД-преграда;

β — константа, определяемая свойствами взрывчатой смеси и преграды;

D — скорость детонации.

Величина β определяется приближенным соотношением [5]

$$\beta = 1 + 0,02(\rho_0 C_0)^{0,24},$$

где: $\bar{C}_0^2 = dp/d\rho_0$ — скорость звука в материале преграды при $\rho = \rho_0$; ρ_0 — начальная плотность материала преграды.

Величина удельного импульса на сжимаемой преграде для любого времени $t > h_3/Dt$ определяется с учетом выражения (3) интегралом

$$i = \int_{h_3/D}^t p_n \left(\frac{h_3}{Dt} \right)^3 \frac{(1-w_0)^3}{\left\{ 1-w_0 \left[1 - \left(\frac{h_3}{Dt} \right)^{\beta-1} \right] \right\}^{3\beta(\beta-1)}} dt. \quad (4)$$

Определить давления и импульса по формулам (3) и (4) для несущих конструкций стартового сооружения можно только при наличии достоверных данных о константах ударных адиабат деформирования бетона и железобетона для различных классов бетона и коэффициентов армирования. В настоящее время имеются данные об ударных адиабатах для не-

которых классов бетона В25 (М-300), которые представляются в виде аппроксимирующей зависимости

$$p = au^b, \quad (5)$$

где: p и u — давление и скорость на границе раздела ПД-преграда; a , b — константы, определенные по экспериментальными исследованиями. Значения величин a , b для некоторых классов бетона приведены в табл. 1.

Известно, что начальные параметры ударных волн на границе ПД-преграда: скорость u_{x0} и давление p_{x0} находятся в следующей зависимости [6]:

$$u_{x0} = \frac{D}{n-1} \left[1 - \sqrt{2n} \frac{p_{x0}/p_n - 1}{\sqrt{\frac{(n-1)p_{x0}}{p_n} - (n-1)}} \right], \quad (6)$$

где: D , p_n — параметры волны детонации;

n — показатель адиабаты, определяемый выражением [2]:

$$n = \frac{10,2(1-1,3\rho_0)}{15,58\rho_0} - 1, \quad (7)$$

где ρ_0 — начальная плотность взрывчатого вещества.

Результаты расчетов для комбинаций взрывчатая смесь из КРТ-бетон приведены в табл. 2.

С использованием выражения (3) для смеси твердый кислород-жидкий водород рассчитано давление p_{x0} на контактной поверхности ПД-железобетонная преграда (бетон В25 (М300)). На рис. 3 представлены расчеты давления p_x для нескольких комбинаций «взрывчатые смеси из КРТ — преграда».

Таблица 1

Среда	Значения величин a и b		Применимость	
	a	b	по u , м/с	По p , Кбар
Бетон В25 (М-300)	12,315	1,272	193,8–1184,3	10–100
$\rho_0 = 2,36$ г/см ³	1,474	1,572	1184,3–2860,6	100–400

Таблица 2

Взрывчатое вещество	Начальные параметры ударных волн		
	u_{x0} , м/с	p_{x0} , МПа	p_{x0}/p_n
Твердый керосин – жидкий кислород	1740	18338	1,17
Жидкий водород – твердый керосин	1244	10835	1,85

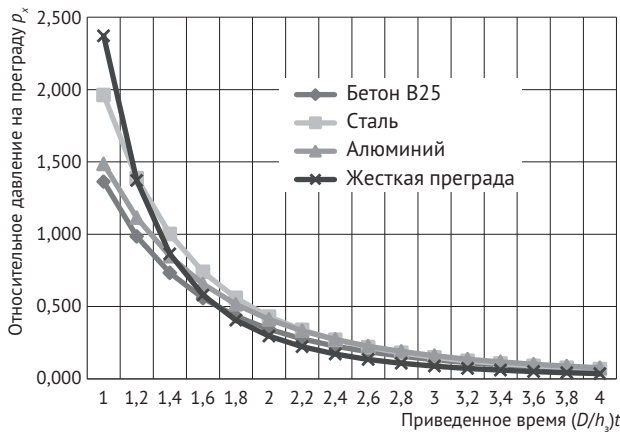


Рис. 3. Зависимость относительного давления на преграду от приведенного времени с учетом сжимаемости разных преград: бетон В25, сталь, алюминий, жесткая преграда

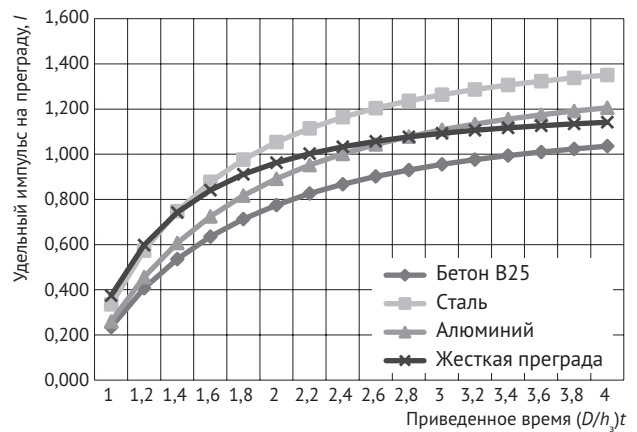


Рис. 4. Зависимость удельного импульса на преграду от приведенного времени с учетом сжимаемости разных преград: бетон В25, сталь, алюминий, жесткая преграда

Величина удельного импульса i (4) для нескольких комбинаций «взрывчатая смесь из КРТ–преграда» представлена на рис. 4. В рассмотренных примерах оценка зависимости давления и импульса от времени выполнена с учетом сжимаемости преград.

Представленные уравнения (4)–(6) рассматривают строго одномерное движение ПД. Для учета бокового разлета ПД и его воздействия на преграду необходимо вместо полной массы заряда подставить в указанные уравнения массу его активной части [1, 2, 6]. Под активной частью заряда понимают часть заряда, продукты детонации которой разлетаются в заданном направлении.

При условии мгновенной детонации разлет продуктов взрыва осуществляется с поверхности заряда, образуя последовательные эквидистантные поверхности разлета, пересекающиеся по биссектрисам углов. Геометрические места точек пересечения образуют поверхности, разделяющие массу заряда на несколько частей, из которых каждая при разлете движется в сторону ближайшей наружной грани заряда (рис. 5).

Влияние формы заряда на массу активной части можно оценить, используя коэффициенты

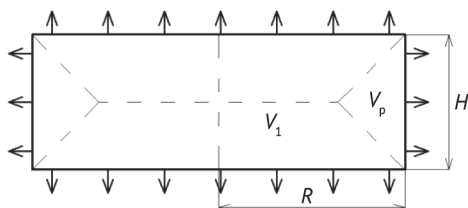


Рис. 5. Схема разлета ПД с заряда ВВ

$$\mu = \frac{V_1}{V_0}, \quad \alpha = \frac{V_p}{V_0},$$

где: V_0 — начальный объем заряда; V_1 и V_p — объемы заряда, разлетающихся перпендикулярно и параллельно преграде соответственно.

Для низкого цилиндрического заряда коэффициент может быть определен следующим образом:

$$\mu = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \frac{H}{R} + \frac{1}{24} \left(\frac{H}{R} \right)^2, \quad (8)$$

где H и R — соответственно высота и радиус цилиндрического заряда (рис. 6).

Под воздействием импульса взрыва I продавленная часть плиты покрытия приобретает кинетическую энергию E_k . При учете прочности плиты часть этой энергии E затрачивается на отрыв массы M от плиты и ее частичное разрушение, а другая часть находится в виде кинетической энергии $E_p = 0,5MU^2$:

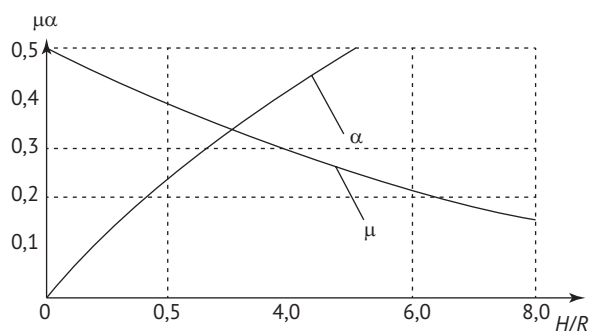


Рис. 6. Влияние формы заряда на величину взрывного импульса

$$E_k = E + E_p.$$

Величина импульса взрыва, действующего на плиту, связана с энергией разрушения плиты E_p , средней скоростью метания U и массы M соотношением [1, 2]

$$I = \theta \sqrt{2ME_k} = \theta \sqrt{2M(E_p + 0,5MU^2)}.$$

Отсюда:

$$U = \sqrt{\left(\frac{I}{\theta}\right)^2 - 2ME_p} / M.$$

Коэффициент θ учитывает то обстоятельство, что разные части массы M могут иметь различную скорость из-за откольных явлений, поэтому количество движения будет меньше, чем при стационарном движении массы M с энергией E_k . Коэффициент θ определяется на основании рекомендаций [1–3].

Энергия разрушения E_p плиты покрытия определяется по формуле:

$$E = \int_0^V A_p dV,$$

где: $A_p = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma_i d\varepsilon_i$ — удельная энергия разрушения;

σ_i, ε_i — интенсивность истинных динамических напряжений и деформаций.

Если ε_i разрушаемого тела одинакова для всех его точек, то

$$E_p = A_p \cdot V \cdot \beta,$$

где β — коэффициент, учитывающий ошибки при определении величины A_p и V в первом приближении $\beta = 1$.

Вертикальное движение обломков разрушенной плиты покрытия описывается дифференциальным уравнением:

$$M\ddot{y} = Mg - 0,5 \cdot C_x \cdot F_H \cdot \rho_{ef} \cdot \dot{y}^2,$$

где: y — вертикальное перемещение; F_H — площадь горизонтального сечения обломка; ρ_{ef} — эффективная плотность воздуха в рассматриваемом объеме, равная средней плотности воздушного потока за время движения обломка; C_x — коэффициент лобового сопротивления, который для обломков принимают равным 1,52.

После интегрирования и обратной замены получают формулы для вертикальной скорости $\dot{y}(t)$ и перемещения $y(t)$ обломка:

$$\dot{y}(t) = \frac{K(R_1 - 1)}{R_1 + 1}; \quad y(t_0) = K^2 g^{-1} \ln \left(ch \left(\frac{gt}{R} \right) \right),$$

где $R_1 = e^{2gt/k}$; $k^2 = 2Mg / C_x \cdot F_H \cdot \rho_{ef}$.

Время падения обломка в зависимости от высоты y определяют по формуле:

$$t = \ln \left(e^R + \sqrt{e^{2R} - 1} \right) k / g, \quad R = gy / k^2.$$

Время падения без учета сопротивления воздуха определяют по формуле:

$$t = \sqrt{2y / g}.$$

К основным характеристикам динамической нагрузки на перекрытие нижележащих этажей от падения обломков плиты покрытия относятся: импульс длительностью τ (мгновенный импульс S), максимальное давление $\max P_{уд}$ при ударе, продолжительность удара $t_{уд}$. На основе расчета характеристик вертикального движения обломков разрушенной плиты покрытия предлагается метод определения нагрузок и воздействий от разрушенной части плиты покрытия на нижележащие конструкции. Данный метод включает определение следующих параметров нагрузок и воздействий.

1. Импульс длительностью τ от удара разрушенной плиты покрытия при $\tau < 0,1T_m$ считается мгновенным (T_m — основной период собственных колебаний конструкций). Мгновенный импульс на перекрытие 1 этажа от воздействия разрушенной плиты покрытия рассчитывают по формуле [1–3]:

$$S = M \cdot U(1 + \gamma),$$

где: M — масса обломка; U — скорость разлета обломка в момент удара; γ — коэффициент восстановления при ударе, равный 0,1.

2. Максимальное значение давления $P_{уд}$ при ударе обломков разрушенной плиты покрытия можно рассчитывать по формуле [1–3]:

$$\max P_{уд} = 0,8 \frac{2I}{t_{уд}},$$

где $t_{уд}$ — продолжительность удара, определяемая временем проникания осколка в преграду.

3. Продолжительность удара $t_{уд}$ определяется в зависимости от скорости падения обломков

$$t_{уд} = 2h/U_0.$$

Коэффициент 0,8 учитывает снижение величины нагрузки от удара за счет потери части удара, идущего на образование воронки.

На основе метода определения нагрузок и воздействий от разрушенной части плиты покрытия на нижележащие конструкции выполнен расчет плиты покрытия стартового сооружения на действие контактного взрыва смеси КРТ: керосин–кислород массой 596,6 тс, водород–кислород массой 43,3 тс. Параметр формы заряда $k = 0,12$. Толщина плиты покрытия составляет 1,85 м.

3. Результаты расчетов и выводы

В результате проведенных расчетов установлено, что плита покрытия будет продавлена и масса продавленной части плиты покрытия составит 96,3 т, скорость встречи с перекрытием нижележащего этажа $U = 33,15$ м/с, импульс, переданный обломками

бетона нижележащему этажу, равен $I = 3,192 \cdot 10^6$ Н с, время действия импульса составит 1 мс. Предложенный метод определения нагрузок и воздействий от разрушенной части плиты покрытия стартовых сооружений может быть использован для аналогичных расчетов применительно к специальным сооружениям различных типоразмеров. Результаты расчетов и предложенный метод определения нагрузок и воздействий от разрушенной части плиты покрытия стартовых сооружений необходим для обоснования объемно-планировочных и конструктивных решений специальных сооружений стартовых комплексов как на этапе проектирования, так и в условиях различных аварийных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станюкович К.П. Неустойчивые движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971. — 856 с.
2. Физика взрыва /Ф.А.Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
3. Горев В.А. Сравнение воздушных взрывных волн от разных источников // Физика горения и взрыва. — 1982. — № 1. — с. 94–101.
4. Оценка безопасности при аварийных разливах и дренаже жидких кислорода и азота / В.Ф. Плешаков, В.И. Макеев, А.П. Чугуев и др. // Кислородная промышленность. — 1978. — № 3. — с. 10–24.
5. Власов О.Е. Основы теории действия взрыва. — М., ВИА, 1957. — 408 с.
6. Детонация / Бохон Ю.А., Головачева И.Ф., Микац В.В. и др. — Черногоровка.: ИХФ АН СССР, 1977. — 114 с.

REFERENCES

1. Stanyukovich K.P. *Neustanovivsheesya dvizheniya sploshnoy sredy* [Unsteady motion of a continuous medium]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 856 p. (in Russian)
2. Baum F.A., Orlenko L.P., Stanyukovich K.P. *Fizika vzryva* [Physics explosion]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 704 p. (in Russian)
3. Gorev V.A. *Sravnienie vozdushnykh vzryvnykh voln ot raznykh istochnikov* [Comparison of air blast waves from different sources]. *Fizika gorenii i vzryva* [Physics of combustion and explosion]. 1982, I. I, pp. 94–101. (in Russian)
4. Pleshakov V.F., Makeev V.I., Chuguev A.P. *Otsenka bezopasnosti pri avariynnykh razlivakh i drenazhezhidkikh kisloroda i azota* [Evaluation of safety in case of emergency spills and drenazhezhidkih oxygen and nitrogen]. *Kislorodnaya promyshlennost'* [Oxygen industry]. 1978, I. 3, pp. 10–24. (in Russian)
5. Vlasov O.E. *Osnovy teorii deystviya vzryva* [Basics steps Bang theory]. Moscow, VIA Publ., 1957. 408 p. (in Russian)
6. Bokhon Yu.A., Golovacheva I.F., Mikats V.V. *Detonatsiya* [Detonation]. Chernogolovka.: IKHF AN SSSR Publ., 1977. 114 p.

Parameters Definition of Dynamic Loading of the Destroyed Part of a Plate of a Covering at Emergency Explosion on a Starting Complex

D.P. Mandritsa, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Military Space Academy named after A.F. Mozhayskiy
V.N. Schelnikov, Candidate of Technical Sciences, Researcher, All-Russian Scientific Research Institute for the Problems of Civil Defense and Emergency Situations

P.M. Mandritsa, Leading Researcher, All-Russian Scientific Research Institute for the Problems of Civil Defense and Emergency Situations

The article considers questions of parameters definition of dynamic loading from the destroyed part of a plate of a covering at emergency Explosion on a starting complex. For the estimation of parameters of dynamic loading the approach based on an experimentally-theoretical estimation of parameters of pulse loading of contact explosion of a mix of components of rocket fuel is used. Dependences for an estimation of parameters of dynamic loading on overlapping of an underlying floor of a starting construction are defined; estimations of dynamic loading from the destroyed part of a covering of a starting construction are received at emergency explosion of mix KPT. The method of definition of loadings and influences from the destroyed part of a plate of a covering on underlying designs is offered.

Keywords: starting construction, emergency explosion, pulse loading, dynamic pressure.