
**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 539.2/6:623.45:662.22

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНЫХ УСКОРЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ
КОНСТРУКЦИИ МАЛОГАБАРИТНОЙ ЯДЕРНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ЕЕ ПАДЕНИИ НА
ПОВЕРХНОСТЬ**

© 2020 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия

В статье проводится исследование одного из этапов развития аварийной ситуации с межконтинентальной баллистической ракетой, сопровождающейся взрывом носителя, выбросом головной части из шахты и последующим ее падением. Выполнено моделирование соударения головной части со слабodeформируемой преградой при падении, проведен анализ результатов расчета и эксперимента.

Ключевые слова: межконтинентальная баллистическая ракета, шахтная пусковая установка, головная часть, слабodeформируемая преграда, ударное ускорение.

Поступила в редакцию 29.11.2019

После доработки 03.02.2020

Принята к публикации 10.02.2020

Основной целью обеспечения безопасности на этапе эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) является принятие эффективных мер, направленных на предотвращение тяжелых аварийных ситуаций (АС). Определение слабых мест этого объекта и формулировка основных принципиальных решений по повышению безопасности осуществляется на основе результатов вероятностного анализа для ЯРОО. Перечень АС, составленный с учетом видов опасностей ядерного оружия (ЯО) [1], значения характеристик внешних воздействующих факторов в моделях аварийных ситуаций определяются с учетом опыта эксплуатации ЯРОО, а также выполненных исследований (экспериментальных и теоретических работ) их безопасности [2]. К настоящему времени широко известно о многочисленных авариях и катастрофах, связанных с ядерным оружием, среди которых особый интерес представляет связанная с взрывом компонентов топлива ракеты с ядерной головной частью (ГЧ). Рост температуры и давления в стволе шахты [3, 4] могут привести к выбросу ГЧ с последующим ее падением.

В 1980 году в шахте взорвалась межконтинентальная баллистическая ракета (МБР) «Титан-2» (США) [5]. Утром 19 сентября 1980 года произошёл взрыв компонентов топлива ускорителя первой ступени МБР, ударная волна вырвала закрытую крышу массой 740 тонн железобетонного защитного устройства шахты (рис. 1). Ускоритель второй ступени вместе со штатной ГЧ Mk.6 с ядерным боеприпасом (ЯБП) W53 были выброшены из шахты. В результате взрыва второй ступени ГЧ (масса – 3690 кг) была подброшена в воздух на 200 метров и упала в 30 метрах от строительного сооружения [6]. Следует отметить, что в СССР также происходили взрывы жидкостных ракет в шахтных пусковых установках, но во всех случаях носители были без ГЧ, которые на время проведения регламентных работ (технического обслуживания) отстыковывались [7, 8]. В подавляющем большинстве

АС, связанных с взрывом носителей ЯО в шахтных пусковых установках, инициирующим событием являлись ошибочные действия персонала.

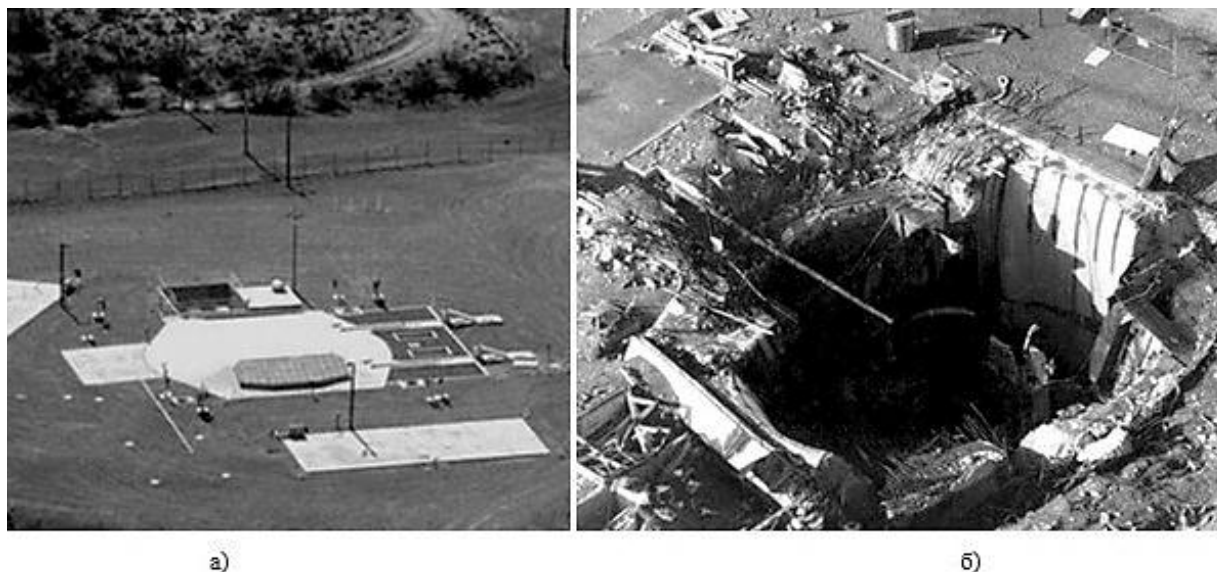


Рисунок 1 – Стартовая позиция межконтинентальной ракеты «Титан-2» (США): а) – до аварии; б) – после взрыва МБР [The starting position of the Intercontinental missile «Titan-2» (USA) a) – before the accident; b) – after the explosion of ICBM]

Для исследования соударения ЯРОО со слабodeформируемой преградой при падении из перечня возможных этапов развития АС [9] выбраны представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Этапы развития аварийной ситуации [The stages of emergency situation development]

№ этапа	Этап	Перечень параметров вторичных воздействий
Э-6	Взрыв ракетного топлива	температура, давление; продолжительность воздействия; скорость выброса ГЧ из шахты ПУ
Э-2	Удар ГЧ о поверхность (преграду)	скорость удара; характеристики преград
Э-13	Взрыв, сгорание	

Проведем моделирование взаимодействия (соударения) объекта со слабodeформируемой преградой (поверхностью) при его падении. Используем математическую модель, приведенную в монографии [10], проведя ее уточнение. Рассмотрим свободное падение объекта по нормали к поверхности. При решении контактной динамической задачи по определению сил, действующих в зоне контакта объекта и преграды, исходим из допущения, что кинетическая энергия падающего объекта в основном перейдет в тепловую энергию удара и потенциальную энергию деформации преграды (условие не разрушения конструкции при падении). Потенциальной энергией упругой деформации конструкции пренебрегаем. В этом случае перегрузка в центре масс (координата X) изделия получится несколько завышенной. На рисунке 2б также представлены: l – общая длина объекта и R – радиус притупления носка. Также примем допущения: форма той части поверхности объекта, которая встречается с преградой, близка к сферической; ось симметрии объекта при соударении нормальна к поверхности преграды; радиус притупления равен X ; движение в области преграды происходит в вертикальной плоскости; скорость встречи объекта с преградой существенно меньше скорости распространения упругих волн в

области преграды. Расчетная схема, выбранная с учетом принятых допущений, представлена на рисунке 2в.

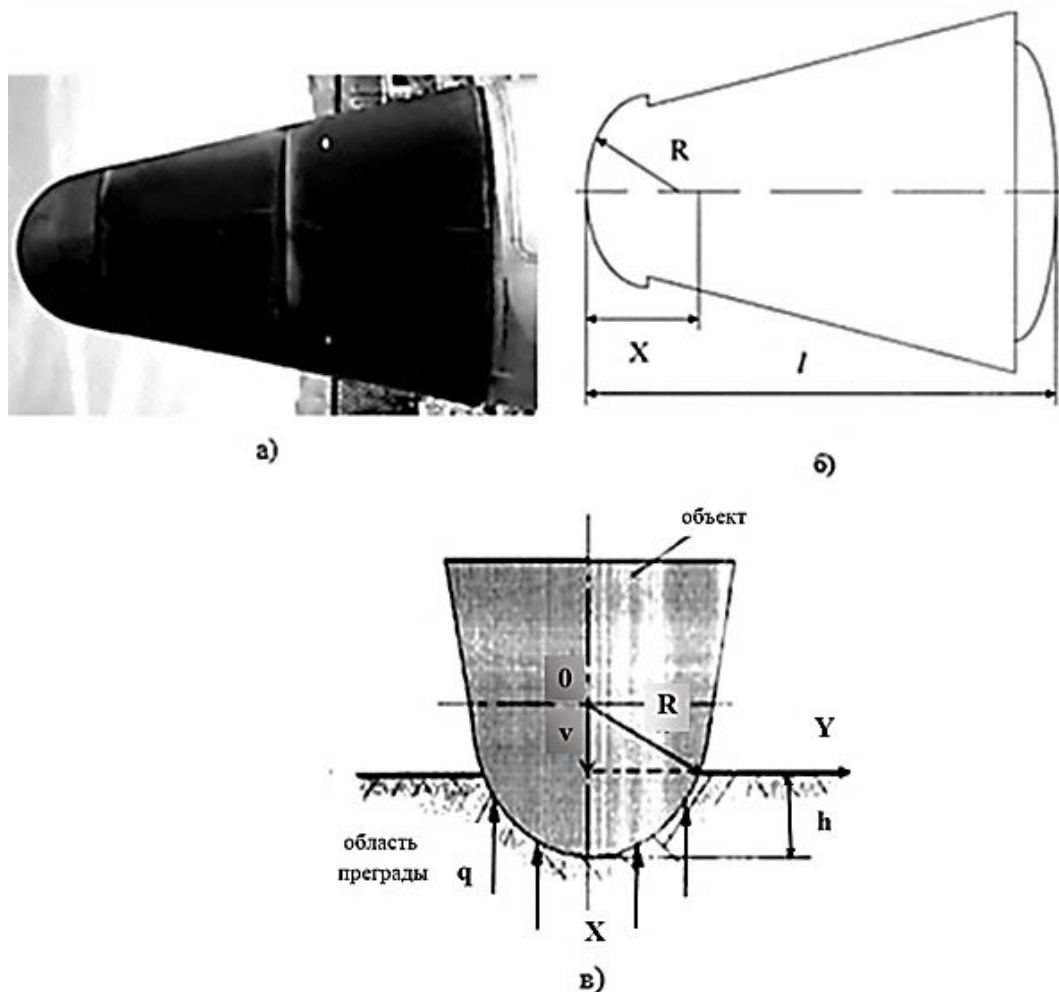


Рисунок 2 – Объект исследования: а) – общий вид; б) – основные геометрические параметры; в) – расчетная схема [Object of research a) – general view; b) – basic geometric parameters; c) – calculation scheme]

При составлении уравнения движения объекта в области преграды для случая, когда вектор скорости направлен перпендикулярно к плоскости поверхности падения, предположим, что вертикальная составляющая реактивного давления со стороны преграды на поверхность контакта постоянна и равна q , причем интенсивность этого давления зависит от скорости движения изделия в области преграды. Уравнение равновесия сил в направлении вертикальной оси изделия будет иметь вид (1):

$$m \cdot \frac{dv}{dt} + N(v) - G = 0, \quad (1)$$

где m , G – масса и сила тяжести объекта;

v – скорость движения в области преграды;

$N(v) = \pi r^2 q$, – равнодействующая сила реакции преграды;

r – радиус лунки.

Если глубина лунки h по сравнению с радиусом поверхности контакта объекта небольшая, то (2):

$$r^2 = 2Rh. \quad (2)$$

Удельное давление q будет пропорционально второй степени скорости движения v (3):

$$q(v) = q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2. \quad (3)$$

Здесь q_0 – наибольшее удельное давление со стороны преграды при вдавливании в него круглого штампа; v_0 – начальная скорость входа изделия в преграду. Тогда (4):

$$m \frac{dv}{dt} + 2\pi R q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right) h - G = 0. \quad (4)$$

Из соотношения $\frac{dh}{dt} = v$ (5):

$$h = \int_0^t v dt + C. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) (с учетом, что в начальный момент времени $h = 0$, то и $C = 0$), получим формулу движения объекта в области преграды (6):

$$m \frac{dv}{dt} + 2\pi R q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \int_0^t v dt - G = 0. \quad (6)$$

Уравнение (3) решается приближенно [11,12] с учетом (7):

$$v = v_0 \cos^2 \frac{\pi t}{2t_0}, \quad (7)$$

где t_0 – время движения объекта в области преграды до остановки.

Тогда ускорение (8):

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{\pi v_0}{2t_0} \sin \frac{\pi t}{2t_0}. \quad (8)$$

Интеграл в выражении (6) дает (9):

$$\int v dt = v_0 \int \cos^2 \frac{\pi t}{2t_0} dt = \frac{1}{2} v_0 \left(t + \frac{t_0}{\pi} \sin \frac{\pi t}{t_0} \right). \quad (9)$$

Выражения (7), (8) и (9) подставим в (6) и решим, используя способ ортогонализации (10):

$$\int_0^{t_0} \left[-\frac{\pi m v_0}{2t_0} \sin \frac{\pi t}{t_0} + \pi R q_0 v_0 \left(t + \frac{t_0}{\pi} \sin \frac{\pi t}{t_0} \right) \cos^4 \frac{\pi t}{2t_0} - G \right] \cos^2 \frac{\pi t}{2t_0} dt = 0. \quad (10)$$

Выражение для определения времени t_0 будет иметь вид (11):

$$t_0 = \frac{0,713G}{Rq_0 v_0} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Rq_0 v_0^2}{1,43Gg}} \right), \quad (11)$$

где g – ускорение свободного падения.

Максимальное значение перегрузки в центре масс объекта (12):

$$n_{\max} = \frac{a_{\max}}{g} = - \frac{\pi Rq_0 v_0^2}{1,43Gg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Rq_0 v_0^2}{1,43Gg}} \right)}. \quad (12)$$

Если пренебречь в уравнении (6) влиянием силы тяжести и принять $G = 0$, то оно примет вид (13):

$$m \frac{dv}{dt} + \frac{2\pi Rq_0}{v_0^2} v^2 h = 0. \quad (13)$$

Проведем замену переменных, тогда $v \frac{dv}{dh} + \frac{2\pi Rq_0}{mv_0^2} v^2 h = 0$ или $\frac{d}{dh} \left(\frac{v^2}{2} \right) + av^2 h = 0$,
где $a = \frac{2\pi Rq_0}{mv_0^2}$.

Обозначив $z = \frac{v^2}{2}$, запишем (14):

$$\frac{d}{dh} \left(\frac{v^2}{2} \right) + av^2 h = \frac{dz}{dh} + 2azh = 0. \quad (14)$$

Разделим переменные и, интегрируя, получим (15):

$$z = C \cdot \exp(-ah^2), \quad (15)$$

где C – постоянная интегрирования. Если $h=0$, то $z = v_0^2$, тогда $z = v_0^2 \cdot \exp(-ah^2)$.

Значение перегрузки в центре масс объекта будет $n = \frac{a}{g} = \frac{\frac{dv}{dt}}{g}$, но
 $\frac{dv}{dt} = v \cdot \frac{dv}{dh} = \frac{dz}{dh}$, тогда (16):

$$n = \frac{a}{g} = \frac{\frac{dv}{dt}}{g} = - \frac{av_0^2}{g} h \exp(-ah^2). \quad (16)$$

Наибольшее значение перегрузки находим из условия $\frac{dn}{dh} = 0$. Глубина лунки, соответствующая максимальному значению перегрузки
 $\frac{dn}{dh} = \frac{av_0^2}{g} \exp(-ah^2) (2ah^2 - 1) = 0$, (17):

$$h = \frac{1}{\sqrt{2a}}. \quad (17)$$

Тогда (18):

$$n_{\max} = -1,075 \frac{v_0}{g} \sqrt{\frac{Rq_0}{m}}. \quad (18)$$

Из формулы (18) видно, что величина перегрузки зависит от радиуса оболочки изделия, его массы и механических свойств преграды. Интенсивность удельного давления со стороны преграды на проникающую лобовую часть изделия и величина радиуса лунки при наибольшей перегрузке, будут равны (19)-(20):

$$q = q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = q_0 \exp(-ah^2) = \frac{q_0}{\exp(0,5)}, \quad (19)$$

$$r = \sqrt{2Rh} = \sqrt{v_0 \sqrt{\frac{mR}{\pi q_0}}}. \quad (20)$$

Для приближенных прочностных расчетов характеристики различных преград можно получить следующим образом, так как поверхность контакта объекта имеет форму, близкую к сферической, то осадка поверхности преграды при проникновении в нее круглого штампа определяется по формулам (21)-(22):

$$\text{– в центре лунки} \quad h_1 = 1,13(1 - \mu^2) \sqrt{F} \frac{q_0}{E}, \quad (21)$$

$$\text{– на границе} \quad h_2 = 0,72(1 - \mu^2) \sqrt{F} \frac{q_0}{E}. \quad (22)$$

Здесь F – площадь поперечного сечения штампа;

μ – коэффициент Пуассона материала преграды;

E – модуль упругости преграды.

Из формул (21) и (22) можно получить усредненное значение осадки преграды – (23):

$$h_{cp} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2) = 0,925(1 - \mu^2) \sqrt{F} \frac{q_0}{E}. \quad (23)$$

Формула (23) определяет взаимосвязь между физико-механическими характеристиками грунта и глубиной лунки. С учетом (17) получим выражение для определения q_0 (24):

$$q_0 = \frac{0,643E^4 \sqrt{a}}{(1 - \mu^2) \sqrt{\pi R a}}. \quad (24)$$

Подставляя (24) в (18) и используя $v_0 = gt$, для определения максимального значения перегрузки получим следующее выражение (25):

$$n_{\max} = -0,904 \frac{H^{0,6} E^{0,4} R^{0,2}}{(1 - \mu^2)^{0,4} m^{0,4} g^{0,5}}, \quad (25)$$

где H – высота падения объекта.

С целью проверки адекватности расчетной модели была проведена серия экспериментов с использованием стенда [13]. На рисунке 3 представлен массово-габаритный макет (МГМ), масса которого могла изменяться ($m = 247 \div 980$ кг), со сменным носком ($R = 0,1; 0,3; 0,6$ м). На рисунке 4 показан фрагмент экспериментального стенда (вертикальный копр с тросом подвески и замком сброса макета), позволяющий обеспечить высоту сброса МГМ в диапазоне $0,28 \div 4,30$ м на поверхность преграды (бетон, мелкий песок и твердая глина). В испытаниях применялся измерительный комплекс, в который входили: система измерения и регистрации ударных ускорений, состоящая из датчиков ускорения, устанавливаемых на элементах конструкции МГМ, и регистратора; скоростная киносъемка сброса, приземления и отскока МГМ.

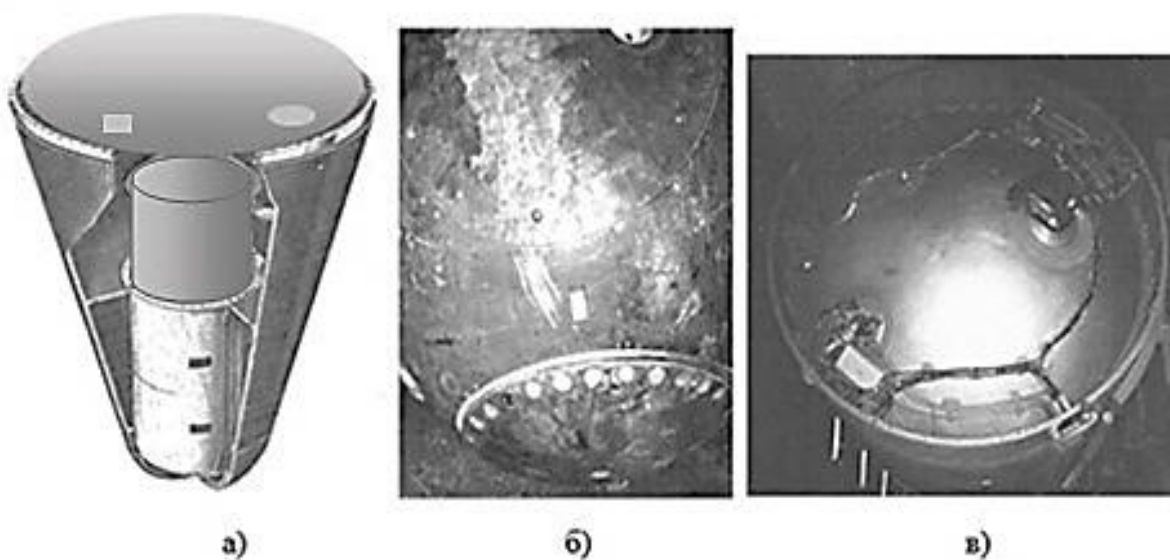


Рисунок 3 – Массово-габаритный макет: а) – компоновочная схема; б) – сменный носок; в) – днище [Mass-dimensional layout a) – Layout diagram; b) – replaceable toe; c) – bottom]



Рисунок 4 – Фрагмент экспериментального стенда [Fragment of the experimental stand]

Результаты экспериментальных исследований и расчетов по формуле (25) для объекта $m = 400$ кг и $R = 0,1; 0,3$ м представлены на рисунке 5.

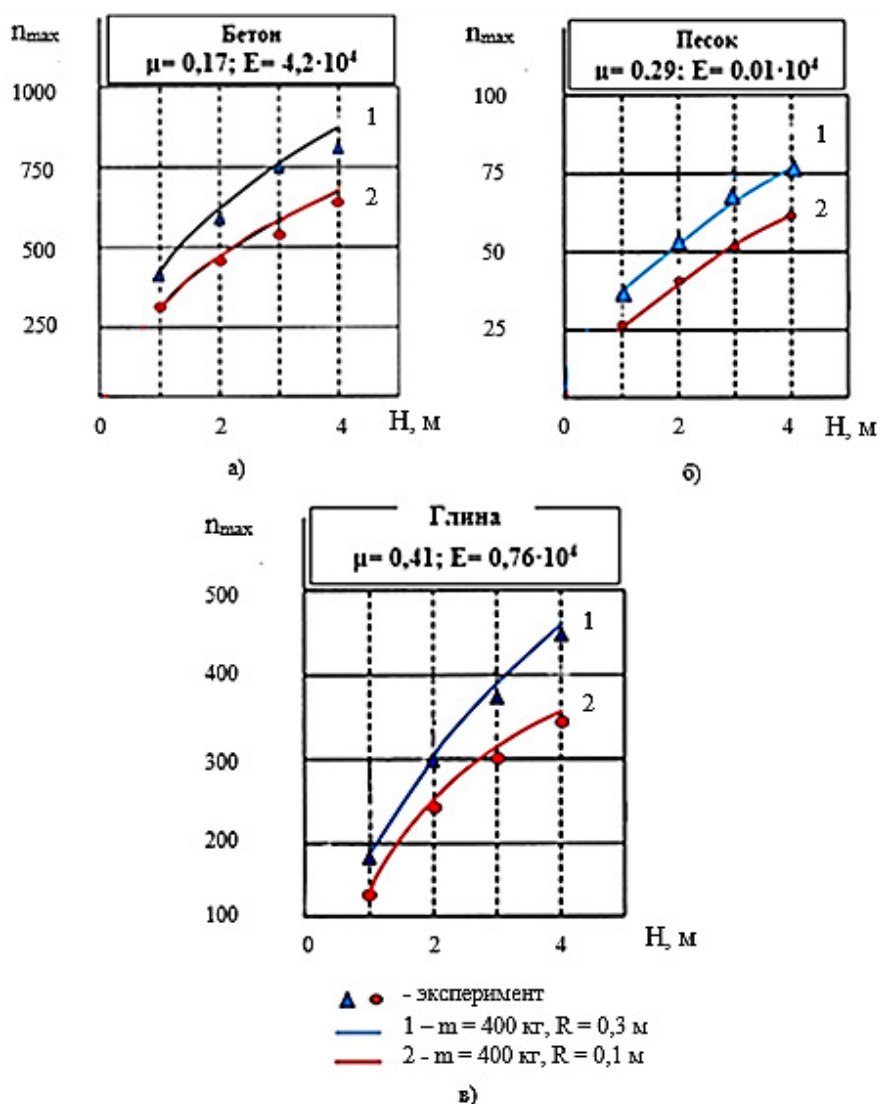


Рисунок 5 – Результаты моделирования падения объекта: а) – на бетон; б) – на мелкий песок; в) – на твердую глину [The results of falling object simulation: a) – concrete; b) – sand; c) – clay solid]

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Расхождение расчетных значений с результатами эксперимента составило: для бетона – до 17%; для песчаной преграды – не более 10%. Бóльшее расхождение для бетонной поверхности обусловлено принятым допущением об условии не разрушения конструкции при падении.

2. Для одной и той же преграды при наименьшей глубине проникновения отмечается наибольшее значение перегрузки в центре масс объекта.

3. Увеличение радиуса носка притупления (при $m = \text{const}$) приводит к росту значений перегрузки.

4. При достижении ударных ускорений на элементах МГМ 160 ед. в зонах крепления грузов отмечались значительные механические повреждения.

5. Результаты расчетов для высот падения 120÷200 метров позволяют прогнозировать полное разрушение конструкции объекта с возможным радиоактивным заражением местности осколками заряда. Однако аварийный взрыв ЯБП маловероятен [5, 10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губеладзе, О. А. Экспресс-оценка результатов нерегламентированных деструктивных воздействий на ядерно- и радиационноопасный объект / О. А. Губеладзе, А. Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4. – С. 24-30.
2. Губеладзе, О. А. Оценка последствий воздействия кинетических ударников на взрывоопасный объект с малогабаритной ядерной энергетической установкой / О. А. Губеладзе, А. Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3. – С. 33-40.
3. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под редакцией Б. П. Жукова. – Москва : Янус К, 2000. – 483 с.
4. Орленко, Л. П. Физика взрыва и удара / Л. П. Орленко. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 304 с.
5. Кириллов, В. М. Физические основы радиационной и ядерной безопасности / В. М. Кириллов. – Москва : РВСН, 1992. – 212 с.
6. Cochran, Thomas B.; Arkin, William M.; Hoenig, Milton M. Nuclear Weapons Databook, Vol. II: U.S. Nuclear Warhead Production. Cambridge, Mass.: Ballinger Publishing Company, 1987. 240 p.
7. Гуляев, А. А. Герои и жертвы «холодной войны» / А. А. Гуляев // Военно-исторический журнал. – 2014. – № 12. – С.47-54.
8. Малиновский, Г. Н. Записки ракетчика / Г. Н. Малиновский. – Москва : ЦИПК РВСН, 1999. – 207 с.
9. Михайлов, В. Н. Безопасность ядерного оружия России / Под редакцией В. Н. Михайлова. – Москва : Министерство по атомной энергии, 1998. – 148 с.
10. Денисов, О. В. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения : монография / О. В. Денисов, О. А. Губеладзе, Б. Ч. Месхи, Ю. И. Булыгин; под общей редакцией Ю. И. Булыгина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278 с.
11. Вайнберг, М. М. Интегро-дифференциальные уравнения / М. М. Вайнберг // Итоги науки. Сер. Мат. anal. Теор. вероятн. Регулир. – 1962, ВИНТИ, Москва, 1964. – С. 5-37.
12. Buša J., Hnati M., Honkonen J., Lucivjanský T. Numerical Solution of a Nonlinear Integro-Differential Equation. Mathematical Modeling and Computational Physics. Published at: EPJ Web of Conferences 108, 02017 (2016).
13. ГОСТ Р ИСО 8568-2010 Национальный стандарт РФ. «Стенды ударные» (введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 441-ст от 12.11. 2010 г.). – URL : <https://internet-law.ru/gosts/gost/50555/> (дата обращения: 17.07.2019).

REFERENCES

- [1] Gubeladze O.A. Express-otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh destruktivnykh vozdeystviy na yaderno- i radiatsionnoopasnyy ob'ekt [Express Assessment of Results of Independent Destructive Impacts on Nuclear and Radiation-Hazardous Object] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2018. №4 (29). P. 24-30 (in Russian).
- [2] Gubeladze O.A. Otsenka posledstviy vozdeystviya kineticheskikh udarnikov na vzryvoopasnyy ob'ekt s malogabaritnoj yadernoj energeticheskoy ustanovkoj [Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at Explosive Object with Small-Scale Nuclear Power Facility] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №3 (32). P. 33-40 (in Russian).
- [3] Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar' [The Power Condensed Systems. Short Encyclopedic Dictionary]. Moskva [Moscow]. Yanus K. 2000. 483 p. (in Russian).
- [4] Orlenko L.P. Fizika vzryva i udara [Physics of Explosion and Blow]. Moskva. FIZMATLIT [Moscow. PHIZMATLIT]. 2008. 304 p. (in Russian).
- [5] Kirillov V.M. Fizicheskie osnovy radiatsionnoy i yadernoy bezopasnosti [Physical Bases of Radiation and Nuclear Safety]. Moskva [Moscow]. RVSН. 1992. 212 p. (in Russian).
- [6] Cochran, Thomas B.; Arkin, William M.; Hoenig, Milton M. Nuclear Weapons Databook, Vol. II: U.S. Nuclear Warhead Production. Cambridge, Mass.: Ballinger Publishing Company, 1987. 240 p.
- [7] Gulyaev A.A. Geroi i gerty «holodnoy vojny» [Heroes and Victims of «the Cold War»] Voenno-istoricheskyy zhurnal [Military Historical Journal]. 2014. № 12. P.47-54 (in Russian).
- [8] Malinovskiy G.N. Zapiski raketnika [Notes of a Rocketeer]. Moskva [Moscow]. CIPK RVSН. 1999. 207 p. (in Russian).

- [9] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moskva. Ministerstvo po atomnoy energii [Moscow. Ministry of Nuclear Energy]. 1998. 148 p. (in Russian).
- [10] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvy'chajny'x situatsiyax. Problemy' i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions]. Rostov-na-Donu. Izdatel'skiy centr DGTU [Rostov-on-Don. Publishing center Don State Technical University]. 2016. 278 p. (in Russian).
- [11] Vainberg M.M. Integro-differentsial'ny'e uravneniya [Integro-Differential Equations]. Itogi Nauki. Ser. Mat. Anal. Teor. Ver. Regulir [The Results of Science. Series Mathematical Analysis Probability Theory Regulation]. 1962. Moskva [Moscow]. VINITI, 1964, pp. 5-37 (in Russian).
- [12] Buša J., Hnati M., Honkonen J., Lucivjanský T. Numerical Solution of a Nonlinear Integro-Differential Equation. Mathematical Modeling and Computational Physics. Published at: EPJ Web of Conferences 108, 02017 (2016).
- [13] GOST R ISO 8568-2010 Nazionalnyj standart RF. «Stendy udarnye» [National Standard of the Russian Federation. Shock Testing Machines. Declaration and Verification of Characteristics]. URL : <https://internet-law.ru/gosts/gost/50555/> (in Russian).

The Determination of Shock Accelerations on a Small Nuclear Power Plant Structural Elements When Falling to the Surface

O.A. Gubeladze¹, A.R. Gubeladze²

Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

¹ORCID iD: 0000-0001-6018-4989

WoS Researcher ID: F-6921-201

e-mail: buba26021966@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0002-6966-6391

WoS Researcher ID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Abstract – The article conducts research one of the expansion phase of emergency with an Intercontinental Ballistic Missile, accompanied by an carrier explosion, an ejection of the reentry vehicle from a silo and its subsequent fall. The simulation of the collision of the reentry vehicle with a weakly deformable barrier in the event of fall is performed, the result calculation valuation and experiment are carried out.

Keywords: intercontinental ballistic missile, silo launcher, head part, weakly deformable barrier, shock acceleration.