

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 539.3:623.454.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТОВОЙ
ПРЕГРАДЫ НА МАЛОГАБАРИТНУЮ ЯДЕРНУЮ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ УСТАНОВКУ ПРИ АВАРИЙНОЙ
СИТУАЦИИ

© 2021 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

В статье рассматривается развитие аварийной ситуации, при которой малогабаритная ядерная энергетическая установка под воздействием продуктов детонации обычного взрывчатого вещества осуществляет движение к грунтовой преграде. Представлена модель, позволяющая определить силу сопротивления преграды для различных начальных скоростей взаимодействия объекта с грунтом.

Ключевые слова: малогабаритная ядерная энергетическая установка, преграда, кинетические ударники, сила сопротивления грунта.

Поступила в редакцию 07.06.2021

После доработки 12.07.2021

Принята к печати 20.07.2021

Страны, обладающие ядерным оружием (ЯО), последовательно наращивают свой потенциал и развивают средства его доставки. Опыт последних вооруженных конфликтов с участием этих государств свидетельствует о низком пороге перехода от приграничных столкновений к полномасштабным боевым действиям [1-3]. Несмотря на то, что они осознают риск спровоцировать ядерный конфликт, при определенных условиях следует ожидать поражение пусковых установок ракет обычными средствами стратегической и тактической авиации, а также крылатыми ракетами морского базирования в рамках проводимой операции на театре военных действий. Возможно поражение или нарушение функционирования подобных ракетных комплексов диверсионно-разведывательными формированиями [4].

Из перечня возможных аварийных ситуаций (АС) с ядерными боеприпасами (ЯБП) и этапов их развития [5] выбрана логическая схема, представленная на рисунке 1.

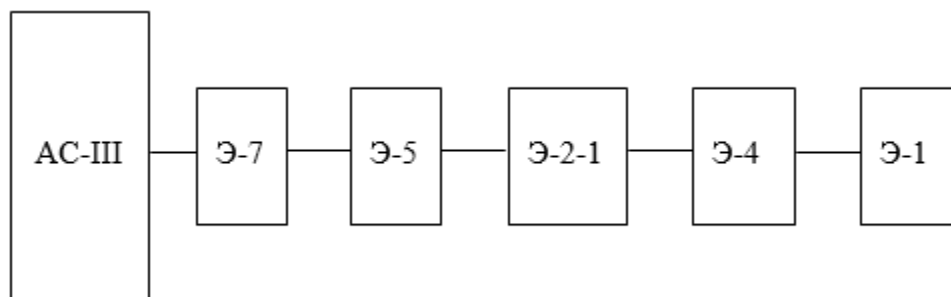


Рисунок 1 – Логическая схема развития аварийной ситуации: Э-7 – воздействие обычных средств поражения; Э-5 – разрушение корпуса двигательной установки; Э-2-1 – пожар (взрыв) топлива ракеты; Э-4 – воздействие фрагментов конструкции ракеты на ЯБП; Э-1 – удар ЯБП о поверхность (преграду). [Logical scheme of the development of an emergency situation: Э-7 – the impact of conventional weapons; Э-5 – the destruction of the propulsion system body; Э-2-1 – fire (explosion) of the rocket fuel; Э-4 – the impact of fragments of the rocket structure on the nuclear munition; Э-1 – impact on the surface (barrier)]

Анализ возможных сценариев развития АС с твердотопливными двигательными установками ракет показал, что наиболее опасным для ЯБП, является ударное воздействие, создаваемое действием продуктов детонации и разгоняемыми элементами конструкции [6]. При взрыве заряда твердого ракетного топлива (ТРТ) давление продуктов детонации распределится по поверхности оболочки корпуса ракеты. Определение скорости метания конструкции U подробно рассмотрено в работе [7]. Наибольший интерес для исследования воздействия на ЯБП представляет:

– движение переднего днища и других элементов конструкции, разделяющих ТРТ и головную часть (агрегатный, соединительный и переходной отсеки), которые будут вовлечены в движение;

– характер ударно-волнового воздействия элементов конструкции ракеты на ЯБП;

– взаимодействие ЯБП с преградой (характеристики и параметры силы сопротивления преграды и ударных ускорений на элементах конструкции объекта).

Развитие рассматриваемой АС иллюстрируется на рисунке 2.

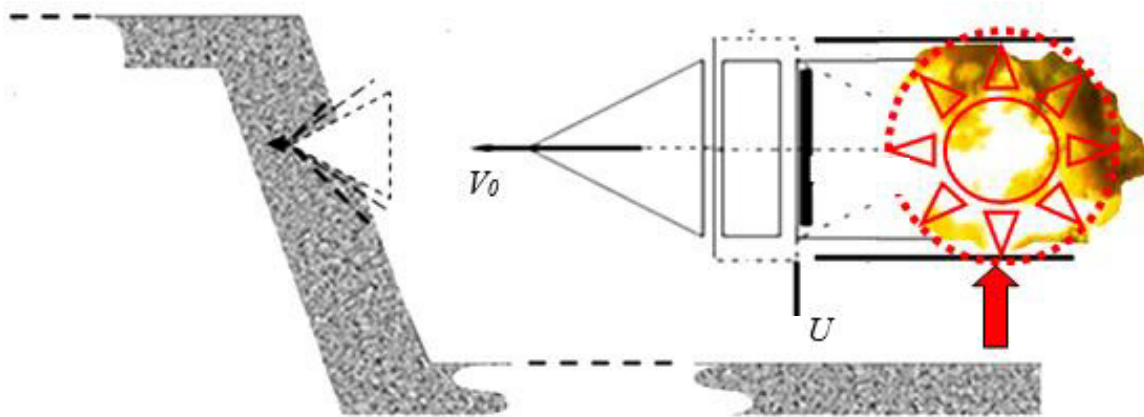


Рисунок 2 – Общая схема развития аварийной ситуации [General scheme of emergency situation development]

Для оценки силы сопротивления преграды и ударных ускорений на элементах конструкции объекта требуется знать закон изменения в течение расчетного отрезка времени силы взаимодействия рассматриваемого объекта с преградой, отражающей зависимость её от механических, геометрических и кинематических характеристик объекта и преграды. Рассмотрим силовые нагрузки при встрече с преградами типа грунт.

Рассмотрим динамику системы «ударник – возмущенная часть преграды», характеризующуюся переменной массой, участвующей в соударении. Объект, имеющий полусферический наконечник, представлен в виде эквивалентной в динамическом отношении многомассовой колебательной системы с сосредоточенными параметрами. Преграда из грунта рассматривается как сплошная среда, обладающая свойством изменять по определенному закону свою плотность при действиях больших по величине сжимающих нагрузок.

Примем следующую схему деформации грунта: при действиях на грунт давлений, не превосходящих некоторого характерного для данного грунта давления P_s , он деформируется по законам несжимаемой идеальной жидкости данной плотности ρ_0 . Введем величину θ характеризующую сжатие грунта. Зависимость сжатия от величины давления показана на рисунке 2. При давлении, равном P_s , происходит «упаковка» грунта до плотности ρ , после чего он деформируется как идеальная жидкость, но уже новой постоянной плотности ρ (считаем, что переход из одного состояния в другое происходит мгновенно [8]). Так как для грунтов величина $P_s = 1,47 \div 1,96$ МПа, то

«упаковка» начинается практически одновременно с началом внедрения полусферического наконечника в преграду.

Принятая схема деформации (рис. 3) достаточно хорошо отражает основные свойства многих видов грунтов при действии относительно больших динамических нагрузок.

При соударении объекта с преградой из грунта, обладающим указанными выше свойством, в нем образуются две зоны:

- а) зона упакованного грунта, прилегающая к сферической поверхности наконечника;
- б) зона невозмущенного грунта.

Граница этих зон, являющаяся фронтом волны «упаковки», распространяется в материале преграды с некоторой скоростью a^* , зависящей от характеристик грунта и скорости соударения V_0 . Зона «упакованного» грунта в дальнейшем именуется возмущенной областью преграды

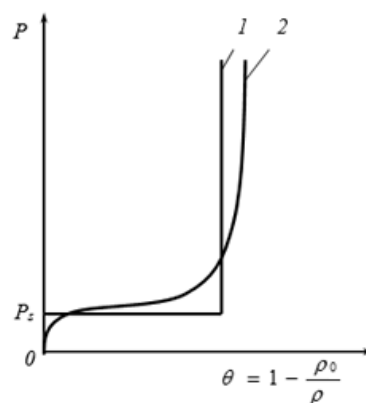


Рисунок 3 – Схема деформации идеального (1) и реального (2) грунтов [Scheme of deformation of ideal (1) and real (2) soils]

Приняв, что на первую массу m_1 эквивалентной системы не действуют никакие другие силы, кроме усилия в упругой связи с жесткостью C_1 , на основании теоремы об изменении количества движения можно записать:

$$(m_1 + m)V - (m_1 + m + \Delta m)(V - \Delta V) = C_1(x_1 - x_2)\Delta t, \quad (1)$$

где m – текущее значение массы возмущенной области;

V – текущее значение скорости встречи;

$\Delta m, \Delta V$ – изменение m и V за бесконечно малый промежуток времени Δt ;

x_1, x_2 – смещение соответственно первой и второй масс эквивалентной системы.

Пренебрегая слагаемыми второго порядка малости и переходя к пределу $\Delta t \rightarrow 0$, можно преобразовать зависимость (1):

$$m_1 \frac{dV}{dt} = \frac{m_1}{m_1 + m} \left[V \frac{dm}{dt} + C_1(x_1 - x_2) \right]. \quad (2)$$

Поскольку в рассматриваемом промежутке времени скорость ударника при соударении с преградой изменяется незначительно (на 5-7%), в уравнении (2) можно

принять $V = V_0$ и $\frac{m_1}{m_1 + m} \approx 1$.

Тогда, с учетом допущений,

$$m_1 \frac{dV}{dt} = V_0 \frac{dm}{dt} + C_1(x_1 - x_2). \quad (3)$$

В тоже время уравнение движения массы m_1 эквивалентной системы в случае рассмотрения динамики ГЧ под действием силы сопротивления $F(t)$ преграды имеет вид:

$$m_1 \frac{dV}{dt} = -F(t) + C_1(x_1 - x_2). \quad (4)$$

Из равенства правых частей уравнений (3) и (4) находится общий вид приближенной зависимости для определения силы сопротивления преграды:

$$F(t) = -V_0 \frac{dm}{dt}. \quad (5)$$

Следует отметить, что полученная формула справедлива как для случая представления ударника в виде эквивалентной схемы с любым числом масс, так и при рассмотрении ее в качестве абсолютно твердого тела.

Величина dm/dt является секундным приростом массы возмущенной области и определяется физическими характеристиками материала преграды и распределением скоростей частиц грунта, находящегося в этой области.

Выведем расчетной зависимости для определения силы сопротивления при допущении, что частицы грунта при встрече ударника с преградой получают скорости и перемещения в направлении вектора V_0 (рис. 2.8, а). Считается также, что вектор скорости V_0 , составляющий угол ψ с нормалью к поверхности преграды, направлен по оси ударника, а геометрическая форма наконечника в течении рассматриваемого промежутка времени не изменяется. Это означает, что вся масса грунта, сосредоточенного в возмущенной области, имеет скорость V_0 , а фронт волны «упаковки», являющийся одной из границ возмущенной области, распространяется в направлении вектора V_0 со скоростью

$$a^* = \frac{V_0}{1-b},$$

где $b = \frac{\rho_0}{\rho}$.

Масса грунта, заключенного в возмущенной области, находится по формуле:

$$m = \rho \int_0^t \pi r^2 (a^* - V_0) \cos \psi dt = \pi \rho V_0 a^* b t^2 \left(R - \frac{1}{3} V_0 t \right) \cos^2 \psi, \quad (6)$$

где R – радиус притупления наконечника; $r^2 = V_0 t (2R - V_0 t)$; $V_c = V_0 \cos \psi$.

Продифференцировав выражение (6) по t и, подставив dm/dt в формулу (5), получим расчетную зависимость для определения силы сопротивления преграды в виде

$$F = \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t) \cos^2 \psi. \quad (7)$$

При $\psi=0$ зависимость (7) преобразуется в формулу для определения силы сопротивления преграды в случае встречи ударника с преградой по нормали:

$$F = \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t). \quad (8)$$

Как отмечалось выше, в настоящее время для определения силы сопротивления преград типа грунт применяется формула, основанная на предположении, что в зоне деформации материала преграды создаются условия, аналогичные гидравлическому удару в трубах:

$$F = \pi \rho_0 V_0^2 a t (2R - V_0 t), \quad (9)$$

где a – скорость звука в грунте.

Сопоставление выражений (8) и (9) показывает, что их отличие заключается только в различном физическом толковании членов a^* и a . Входящая в формулу (9) величина a зависит только от параметров грунта и характеризует распространение в нем слабых возмущений, т.е. возмущений, при которых грунт можно рассматривать как линейно упругую среду. В тоже время известно, что явление соударения ударника с преградой сопровождается большими пластическими деформациями грунта. Величина a^* , входящая в формулу (8), характеризует распространение в грунте волн конечной амплитуды (сильных возмущений) и определяется величиной объёмной деформации грунта и скорости соударения.

Рассмотрим решение этой же задачи при допущении, что между поверхностями наконечника ударника и материалом преграды не существует касательных сил, и частицы грунта получают количество движения в направлении нормали к поверхности наконечника (рис. 4). В этом случае скорость частиц в возмущенной области зависит от их расположения относительно поверхности наконечника. Так, скорость частиц, расположенных левее плоскости, проходящей через линию $O-O$ и перпендикулярной плоскости чертежа (на рис. 4б область I), равна $V_0 \cos(\gamma - \psi)$, где γ – угол между нормалью к сферической поверхности наконечника в данной точке и нормалью к поверхности преграды. Скорость частиц грунта, распределенных в области II, равна $V_0 \cos(\gamma + \psi)$.

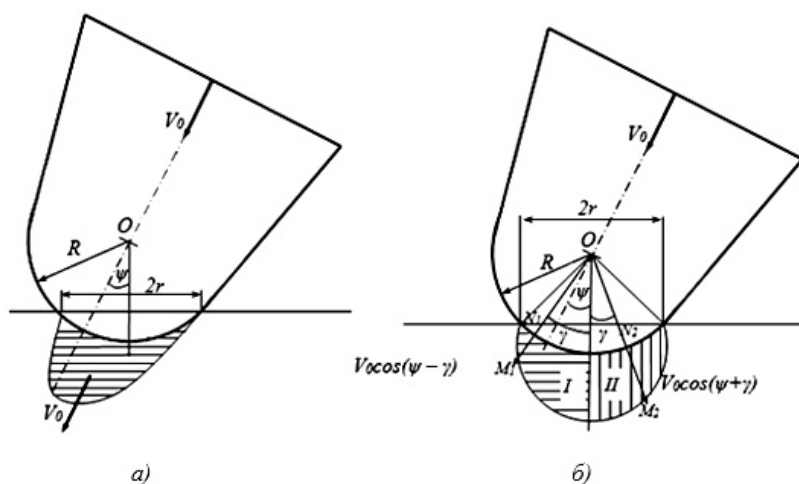


Рисунок 4 – Схема образования в грунте возмущенной области: *a* – при допущении о движении материала преграды в направлении V_0 ; *б* – при допущении о движении материала преграды в направлении нормали к поверхности наконечника [Scheme of formation of a disturbed area in the ground *a* – assuming the movement of the barrier material in the direction V_0 ; *b* – assuming the movement of the barrier material in the direction normal to the tip surface]

Количество движения, получаемое в направлении V_0 частицами грунта, «упакованными» вдоль отрезков M_1N_1 и M_2N_2 , пропорционально соответственно $\cos^2(\gamma - \psi)$ и $\cos^2(\gamma + \psi)$. Поэтому приведенные массы материала преграды, распределенного вдоль M_1N_1 и M_2N_2 , пропорциональны соответственно $M_1N_1 \cos^2(\gamma - \psi)$ и $M_2N_2 \cos^2(\gamma + \psi)$, а приведенная масса всей возмущенной области преграды эквивалентна массе грунта плотности ρ , заключенного в объеме, ограниченном сферической поверхностью наконечника и поверхностью, описываемой в сферической системе координат с полюсом в точке O уравнениями:

$$\begin{aligned} r_{Inn} &= R + \frac{ba^*}{V_0} [R \cos \gamma - (R - V_0 t)] \cos^3(\gamma - \psi), \\ r_{Inl} &= R + \frac{ba^*}{V_0} [R \cos \gamma - (R - V_0 t)] \cos^3(\gamma + \psi). \end{aligned} \quad (10)$$

Приведенная масса возмущенной области преграды находится по формуле:

$$\begin{aligned} m &= \rho \int_0^\pi \int_0^{r_{Inp}} \int_0^R r_\varphi^2 \sin \gamma d\gamma d\varphi d\rho_\varphi + \rho \int_\pi^{2\pi} \int_0^{r_{Inp}} \int_0^R r_\varphi^2 \sin \gamma d\gamma d\varphi d\rho_\varphi = \\ &= \frac{1}{3} \pi \int_0^\gamma [(r_{Inp}^3 - R^3) + (r_{Inl}^3 - R^3)] \sin \gamma d\gamma, \end{aligned} \quad (11)$$

где r_φ – радиус-вектор фронта волны «упаковки»;

$$\gamma_t = \arccos \frac{R - V_c}{R}.$$

Продифференцировав выражение (11) и подставив dm/dt в формулу (5), находим расчетную зависимость для определения силы сопротивления преграды

$$\begin{aligned} F(t) &= \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t) \cos^2 \psi + \\ &+ \pi \rho_0 V_0 a^* \left\{ V_0 t (2R - V_0 t) \cos \psi \left[\frac{V_0 t}{2R^2} (2R - V_0 t) (3 - 4 \cos^2 \psi) - \sin^2 \psi \right] + \right. \\ &+ \frac{b^2 a^{*2}}{V_0^2} \left[\frac{(R - V_0 t)^{12}}{330 R^{10}} A_1(\psi) + \frac{(R - V_0 t)^{10}}{5 R^8} A_2(\psi) \right] + \frac{(R - V_0 t)^8}{14 R^6} A_3(a^*, \psi) + \\ &+ \frac{2(R - V_0 t)^6}{R^4} A_4(a^*, \psi) + \frac{(R - V_0 t)^4}{2 R^2} A_5(a^*, \psi) + (R - V_0 t)^2 A_6(a^*, \psi) + \\ &\left. + \frac{R(R - V_0 t)}{35} A_7(a^*, \psi) + R^2 A_8(a^*, \psi) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где A_i – коэффициенты, зависящие от V_0 , ψ , b .

При $\psi = 0$ зависимость (12) преобразуется в формулу для определения силы сопротивления преграды при соударении с ней ударника по нормали:

$$F(t) = \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t) + \pi \rho_0 V_0 a^* \left\{ -\frac{V_0^2 t^2}{2R^2} (2R - V_0 t)^2 + \frac{ba^*}{14V_0^2} \left[R(R - 8V_0 t) - \frac{(R - V_0 t)^8}{R^6} \right] - \frac{b^2 a^{*2}}{V_0^2} \left[\frac{(R - V_0 t)^{12}}{330R^{10}} - \frac{1}{5} (R - V_0 t)^2 + \frac{4}{11} R(R - V_0 t) - \frac{1}{6} R^2 \right] \right\}. \quad (13)$$

В качестве примера в таблице 1 представлены результаты расчета силы сопротивления преграды для объекта с полусферическим наконечником.

Таблица 1 – Результаты расчета [Calculation results]

V_0 , м/с	R , м	ψ , град	F , кН	
			по формуле (7)	по формуле (12)
235	30	70	36	34
240	30	45	49	41
210	30	0	98	56

Полученные результаты расчета различных вариантов (комбинации V_0 , R и ψ) для ударников с полусферическим наконечником позволили сделать следующие выводы: при взаимодействии с грунтовой преградой ударника (со скоростями до 1200 м/с) его следует рассматривать как абсолютно твердое тело [9]; наличие угла ψ приводит к неравномерности распределения давления по боковой поверхности ударника в окружном направлении и к увеличению его максимальной величины. Последний вывод указывает на необходимость исследовать влияние формы образующей поверхности ударника на характер проникания (учет касательных напряжений). Анализ результатов моделирования проникания в грунт ударников различных форм проводился на основе сравнения сил сопротивления как с учетом трения ($\mu = 0,5$), так и без него ($\mu = 0$). Установлено что, начиная со скоростей 100 м/с, учет касательных напряжений приводит к завышенным значениям силы сопротивления и в данном случае является необоснованным. Для расчета сил сопротивления использована модель с учетом нелинейной сжимаемости грунтовой среды и внутреннего трения [10]. На рисунке 5 представлены зависимости силы сопротивления от скорости V_0 в диапазоне от 90 до 280 м/с для ударников одинаковой массы при $\psi = 0^\circ$ (по нормали): конических с углами раствора конуса 30° и 60° , а также ударника оптимальной формы (образующая оживальной формы со сферическим наконечником).

Из графика видно, что для ударников с меньшим углом раствора при увеличении скорости сила сопротивления возрастает более плавно, чем для ударников с большим углом. Для скоростей около 90 м/с различие составляет $\sim 35\%$, а для скоростей около 200 м/с различие составляет $\sim 50\%$ от наибольшего значения.

Для проверки адекватности разработанной модели проводились экспериментальные исследования. На начальном этапе с целью определения исходных данных для планирования крупномасштабного эксперимента предварительно осуществлены исследования в лабораторных условиях. На стенде, включающем в себя баллистическую установку и контейнер-мишень с грунтом (рис. 6а) моделировалось проникание в грунт ударников (рис. 6б) различной формы и массы с различными скоростями.

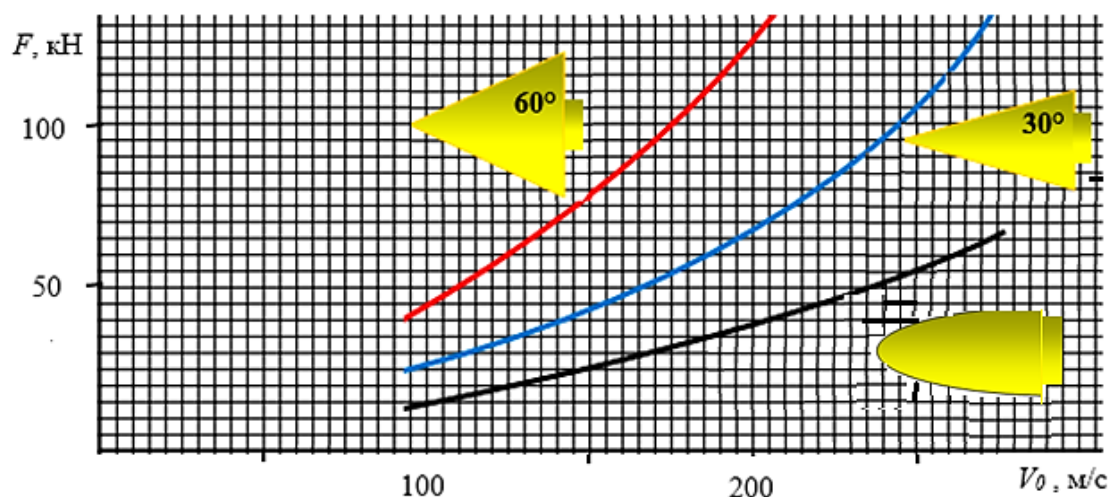


Рисунок 5 – Зависимость силы сопротивления от скорости и формы ударников
[Dependence of the resistance force on speed and shape of the strikers]



a)



b)

Рисунок 6 – Отработка элементов плана крупномасштабного эксперимента в лабораторных условиях:
a – контейнер-мишень; б – образцы ударников [Working out the elements of the plan of a large-scale
experiment in the laboratory a – container-target; b – samples of strikers]

Так как грунт обладает свойствами упруго-пластичной среды, дополнительно исследован процесс проникания ударников различной формы в вязкую среду (рис. 7). Был использован пластилин, так как он имеет физико-механические характеристики близкие к свойствам глинистых грунтов. Данный процесс можно разделить на этапы: соударение; формирование каверны; режим развитой кавитации (за ударником образуется не схлопывающаяся каверна, диаметр которой превышает максимальный диаметр ударника) (рис. 7a); режим частичной кавитации, когда при снижении скорости диаметр каверны уменьшается и в итоге становится равным диаметру ударника (рис. 7б); сплошное обтекание (рис. 7в).

Исследования зависимости параметров движения ударника в вязкой среде от угла подхода к поверхности раздела проводились при практически постоянной температуре $17 \pm 1,5^\circ\text{C}$ (для обеспечения стабильности механических свойств вязкой среды). Скорость подхода ударника к преграде (границе раздела) составляла $132 \div 141$ м/с. Углы варьировались от 0° до 75° .

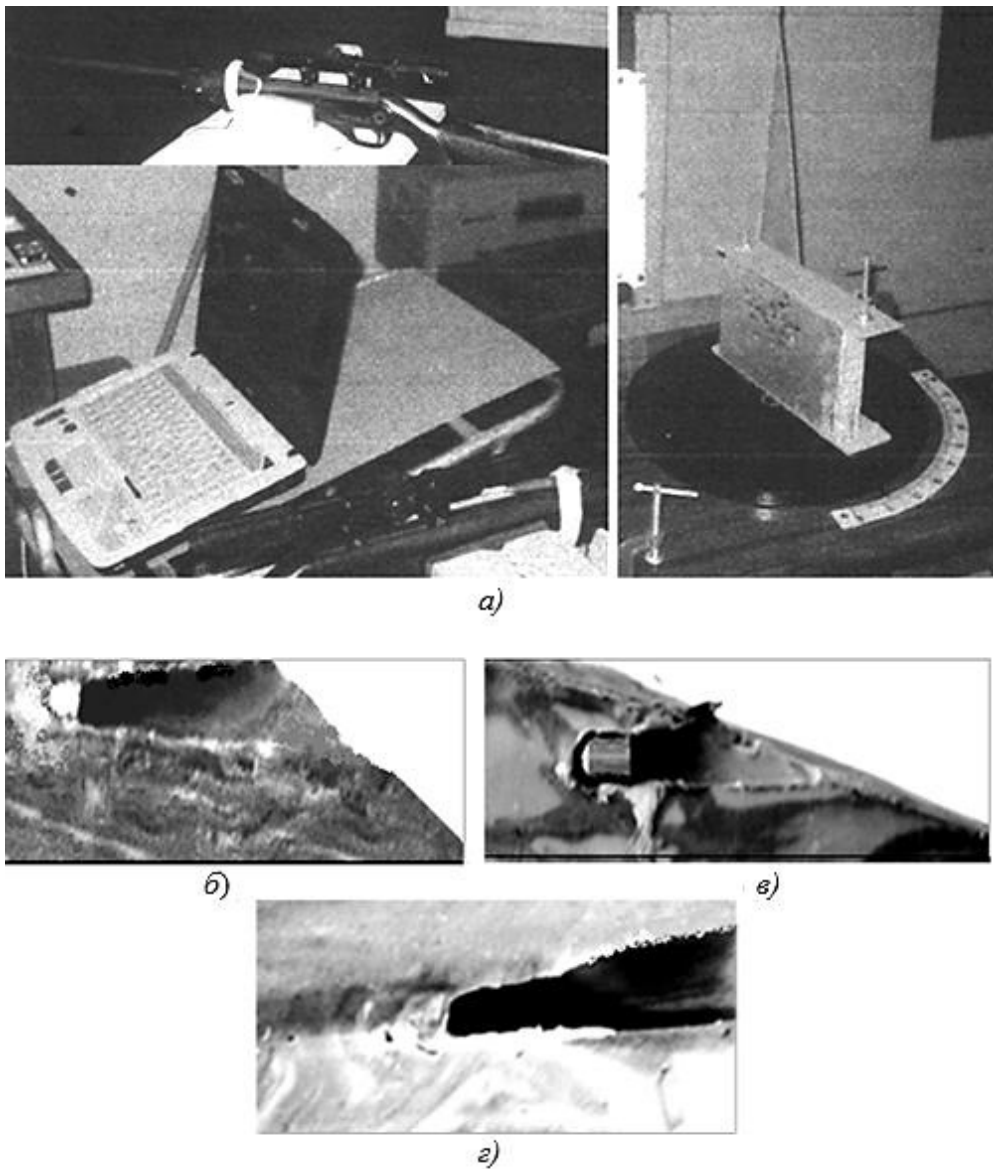


Рисунок 7 – Экспериментальные исследования процесса проникания ударников в вязкую среду: *a* – элементы экспериментальной установки; *b* – внедрение при $\psi = 45^\circ$; *c* – внедрение при $\psi = 70^\circ$; *d* – внедрение при $\psi = 0^\circ$ [Experimental studies of the process of penetration of strikers into a viscous medium: *a* – elements of the experimental setup; *b*-introduction at $\psi = 45^\circ$; *c*-introduction at $\psi = 70^\circ$; *d*-introduction at $\psi = 0^\circ$]

Установлено, что максимум перегрузки конический ударник будет испытывать при проникании на глубину равную высоте конуса (для ударников со сферическим наконечником общей высоте). Причем перегрузки для ударников с раствором 60° вдвое выше, чем для ударников с раствором 30° .

Полученные в ходе лабораторных исследований результаты позволили оптимизировать серию крупномасштабных экспериментов по моделированию ударно-волнового воздействия продуктов детонации на объект (рис. 8,*a*) с последующим прониканием его в грунтовой массив (рис. 8*в,г*). Для проведения исследований был использован стенд [12], расположенный на мишенном поле (рис. 8,*б*).

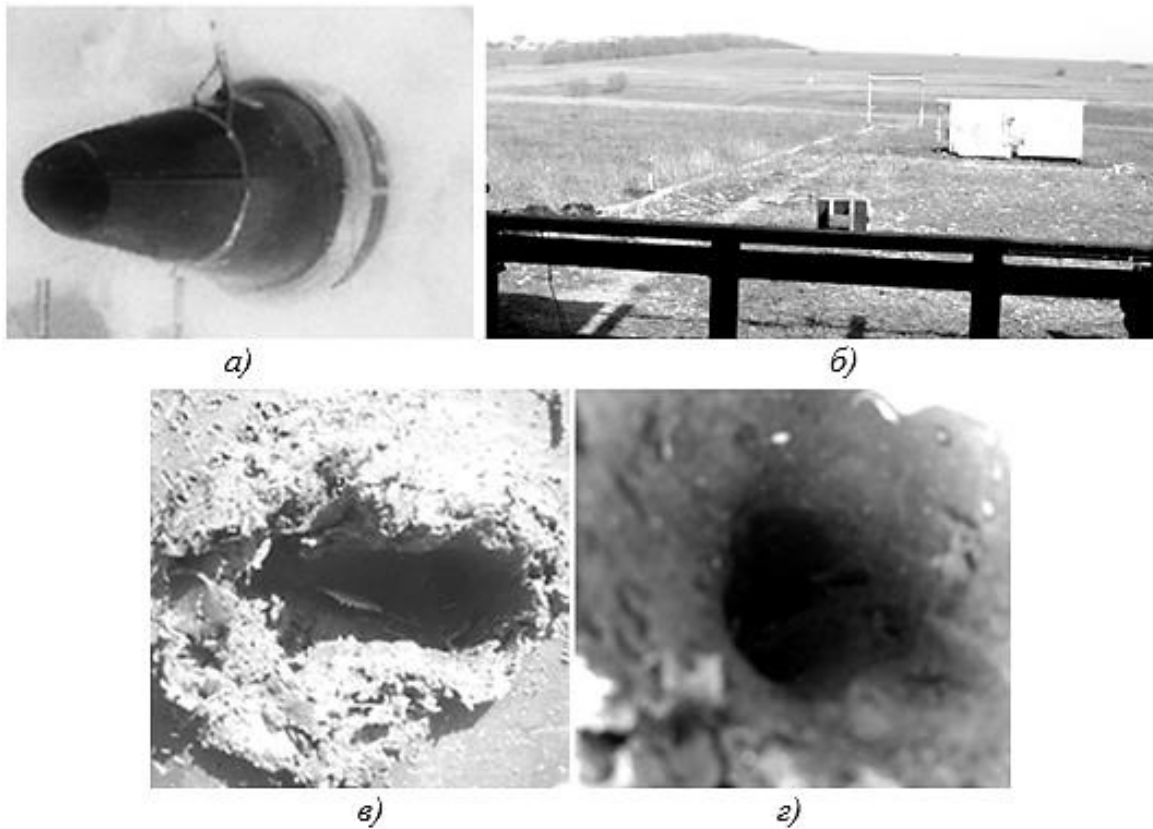


Рисунок 8 – Крупномасштабный эксперимент: *a* – момент срабатывания ПАД; *б* – мишенное поле; *в* – воронка при $\psi = 70^\circ$; *г* – воронка при $\psi = 45^\circ$ [Large-scale experiment: a – the moment when the PPA is triggered; b-the target field; c-the funnel at $\psi = 70^\circ$; d-the funnel at $\psi = 45^\circ$]

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать вывод что, возникновение аварийного взрыва объекта, а также разрушение его конструкции с возможным радиоактивным заражением местности осколками заряда при развитии данной аварийной ситуации маловероятно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев, М.С.* Сравнительный анализ военных доктрин Индии и Пакистана / М.С. Зайцев // Сравнительная политика. – 2018. – № 3. – С. 14-25.
2. *Hoodbhoy P., Mian Z.* Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016, Mode of access: <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415>.
3. *Hans M. Kristensen & Robert S. Norris.* North Korean nuclear capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists, VOL.74, NO.1, 41-51, <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>
4. *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.
5. *Михайлов, В.Н.* Безопасность ядерного оружия России / В.Н. Михайлов. – Москва : Мин. по атомной энергии. – 1998. – 148 с.
6. *Губеладзе, О.А.* Оценка результатов нерегламентированных воздействий на взрывоопасный объект / О.А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 61-63.
7. *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.
8. *Лаврентьев, М.А.* Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – Москва : Наука – 1973. – 416 с.

9. Губеладзе, О.А. Определение ударных ускорений на элементах конструкции малогабаритной ядерной энергетической установки при ее падении на поверхность / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 7-16.
10. Григорян, С.С. Приближенное решение задачи о проникании тела в грунт / С.С. Григорян // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1993. – № 4. – С. 18-24.
11. Баженов, В.Г. Решение задачи о наклонном проникании осесимметричных ударников в мягкие грунтовые среды на основе моделей локального взаимодействия / В.Г. Баженов, В.Л. Котов // Прикладная математика и механика. – 2010. – Т. 74. Вып. 3. – С. 391-402.
12. 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.) [Электронный ресурс]. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50555/> (дата обращения: 17.05.2021)

REFERENCES

- [1] Zaytsev, Mikhail S. Sravnitel'nyi analiz voennykh doktrin Indii i Pakistana [Comparative Analysis of Military Doctrines of India and Pakistan] Sravnitel'naja politika [Comparative Politics] 2018, No. 3, pp. 14-25(in Russian).
- [2] Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear Battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016. URL: <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415> (in English).
- [3] Hans M. Kristensen, Robert S. Norris (2018) North Korean Nuclear Capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists. Vol.74. No.1. P.41-51. URL: <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20> (in English).
- [4] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvy'chajny'x situacijax. Problemy' i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions.]. Rostov-on-Don. Publishing center Don State Technical University. 2016. 278 p. (in Russian).
- [5] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moscow. Min. po atomnoj energii [Ministry of Nuclear Energy]. 1998. 148 p. (in Russian).
- [6] Gubeladze O.A. Otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh vozdeystvii na vzryvoopasnyy ob'ekt [Estimating of Unregulated Influence Results on Explosive Object]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2011. №1(1). P.61-63 (in Russian).
- [7] Gubeladze O.A. Express-otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh destruktivnykh vozdeystvii 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).
- [8] Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. Problemy gidrodinamiki i ih matematicheskie modeli [Problems of Hydrodynamics and their Mathematical Models]. Moscow. Nauka. 1973. 416 p. (in Russian).
- [9] Gubeladze O.A. Opredelenie udarnykh uskorenij na elementah konstrukcii malogabaritnoj yadernoj energeticheskoj ustanovki pri ee padenii na poverhnost [Determination of Shock Accelerations on Small Nuclear Power Plant Structural Elements in the Event of Fall to the Surface] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2020. №1(34). P.7-16 (in Russian).
- [10] Grigorjan S.S. Priblizhennoe reshenie zadachi o pronikanii tela v grunt [Approximate Solution of the Problem of Body Penetration into the Ground]. Izvestiya RAN. Mehanira zhidkosti i gaza [Izvestiya RAS. Fluid and Gas Mechanics]. 1993. №4. P.18-24 (in Russian).
- [11] Bazhenov V.G., Kотов V.L. Reshenie zadachi o naklonnom proniranii osesimmetrichnykh udarnikov v mjagkie gruntovye sredy na osnove modelej lokalnogo vzaimodejstvija [Solution of the Problem of Oblique Penetration of Axisymmetric Impactors into Soft Ground Environments Based on Local Interaction Models]. Prikladnaja matematika i mehanika [Applied Mathematics and Mechanics]. 2010. Volume 74. Issue 3. P.391-402 (in Russian).
- [12] 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).

Determination of Soil Barrier Resistance Influence to Compact Nuclear Power Plant at Emergency Situation

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 discusses the development of an emergency situation in which a compact nuclear power plant, under the influence of the conventional explosive detonation products, moves to a ground barrier. A model that makes it possible to determine the obstacle resistance force for various initial object-soil interaction velocities is presented.

Keywords: small-sized nuclear power plant, barrier, kinetic impactors, ground resistance force.