

В то же время для повышения точности попадания в цель необходимо определенное увеличение диаметра юбки. Для выбора наилучшего варианта необходимы дополнительные исследования по сравнению точности попадания в цель и пробивной способности элементов с разным удлинением, наполненностью и диаметром юбки.

По предварительным оценкам, влияние наполненности элемента на пробивную способность сильнее, чем удлинения, поэтому более целесообразным является использование элементов с большей наполненностью и одновременно развитой юбкой, формирование которой позволит повысить точность попадания элементом в цель. Поэтому заряды с облицовками дегрессивной формы имеют преимущество перед зарядами с облицовками прогрессивной и равнотолщинной форм.

На основе результатов выполненных исследований получены графические зависимости изменения параметров формы высокоскоростного удлиненного элемента от разнотолщинности и физико-механических параметров материала облицовки снарядоформирующего заряда. Показано, что для облицовок дегрессивных форм, возможно формирование удлиненных высокоскоростных элементов с развитой хвостовой частью, что положительно сказывается на аэродинамической устойчивости элемента в процессе полета. Для зарядов с прогрессивными облицовками характерно получение более длинных, но слабонаполненных элементов, что негативно сказывается на их пробивной способности.

### Список литературы

1. Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. Наука и образование, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (дата обращения 10.12.2016).
2. Боеприпасы. т.1, Селиванов В.В., ред. Москва, Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2016, 506 с.
3. Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып.12. С. 1-19 URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
4. Круглов П.В., Колпаков В.И. Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удлиненных элементов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2018, вып.7. С. 1-10 URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>.
5. Круглов П.В., Болотина И.А. Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып.9. С. 1-11. URL:<http://dx.doi.org/10.18968/2308-6033-2017-9-1674>.
6. Круглов П.В., Болотина И.А. Применение ориентированных гиперграфов ограничений при проектировании технологии изготовления высокоточных конструкций // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2016. №5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-05-1494>.

## БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ О ТОНКУЮ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПРЕГРАДУ

*А.М. Куся<sup>1</sup>, В.А. Марков<sup>2</sup>, Ю.В. Попов<sup>2</sup>, В.И. Пусев<sup>2</sup>, С.И. Сычев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> АО «Корпорация «ТРВ», Королёв, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе используется квазидинамический подход к расчету ударно-проникающего действия. Тогда для недеформируемых (малодеформируемых) ударников оживально-цилиндрической

формы работу по разрушению тонкой преграды ( $h/d < 0,5$ , где  $h$  – толщина преграды,  $d$  – диаметр ударника) можно представить в виде [1, 2]:

$$W = \pi R^2 h \left[ \frac{1}{2} \sigma_{td} + \frac{1}{16} \rho_t \pi^2 \left( \frac{V_0 R}{L} \right)^2 \right] \quad (1)$$

где  $W$  – работа по разрушению преграды;  $R$  – радиус ударника;  $h$  – толщина преграды;  $\sigma_{td}$  – динамический предел текучести материала преграды при растяжении;  $\rho_t$  – плотность материала преграды;  $V_0$  – скорость удара;  $L$  – длина оживальной части ударника.

Приравнивая работу из выражения (1) к кинетической энергии ударника, получим выражения для определения предельной толщины пробиваемой преграды, баллистического предела и остаточной скорости:

$$h_{lim} = \frac{8m_a V_0^2 L^2}{\pi R^2 (8\sigma_{td} L^2 + \rho_t \pi^2 V_0^2 R^2)} \quad (2)$$

$$V = 2RL \sqrt{\frac{2\pi h \sigma_{td}}{(8m_a L^2 - \pi^3 h R^4 \rho_t)}} \quad (3)$$

$$V_r = \sqrt{V_0^2 - \frac{\pi R^2 h}{m_a} \left[ \sigma_{td} + \frac{1}{8} \rho_t \pi^2 \left( \frac{V_0 R}{L} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

где  $m_a$  – масса ударника;  $h_{lim}$  – предельная толщина пробиваемой преграды;  $V$  – баллистический предел;  $V_r$  – остаточная скорость ударника после пробития преграды.

Квазидинамический подход позволяет учитывать прочностное и инерционное сопротивление преграды. Такой подход, как любая расчетная модель, требует сравнения результатов расчета с экспериментальными данными (верификации). Для верификации был выбран случай наиболее удачного применения первой управляемой авиационной бомбы (УАБ) РС-1400 FX («Фриц-Х») (Германия [3]) против линкора (ЛК) «Рома» (тип «Витторио Венето», Италия), который вызвал его потопление. Согласно техническому отчету США [4], первая в мире УАБ «Фриц-Х» имела диаметр корпуса 558,8 мм и полную массу приблизительно 1650 кг.

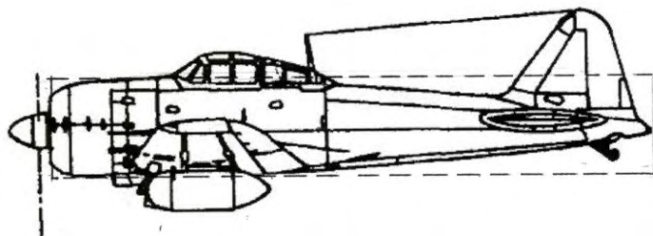
Первая УАБ пробилла корабль насквозь и взорвалась в воде под корпусом корабля. Вторая УАБ взорвалась во внутреннем объеме и вызвала потопление ЛК. На основании [5-7] были разработаны необходимые для расчета мишенные обстановки при попадании УАБ. Для постройки ЛК типа «Витторио Венето» применялись тяжелая гомогенная броня марки AOD и высокопрочная конструкционная сталь марки ER [7].

Следует отметить, что относительные толщины пробиваемых преград или тонкие ( $h/d < 0,5$ ), или очень тонкие ( $h/d < 0,1$ ), а суммарные толщины пробиваемых преград находятся в области тонких преград ( $h/d < 0,5$ ). Можно рассчитать время движения УАБ внутри корабля с учетом потери скорости при пробитии преград. Если пренебречь, ввиду относительной малости, временем пробития преград, то получим время замедления срабатывания взрывателя УАБ:  $t_1 > 0,082$  с (так как не учитывалось движение в воде) и  $t_2 = 0,084$  с. Следует отметить, что в целом результаты расчета соответствуют описаниям потопления ЛК «Рома» [5-7]. В отличие от первых УАБ, современные летательные аппараты (ЛА) являются деформируемыми. Процессы пробития при высокоскоростном ударе из-за своей сложности изучаются с применением экспериментальных результатов. Для проведения верификации предлагаемой модели использовались экспериментальные данные, но по отношению к предшественникам противокорабельных ракет – самолетам с подвешенными авиационными бомбами (АБ). В этом случае в качестве системы управления был пилот (камикадзе), а в качестве боевой части – АБ. Причем АБ взаимодействовала с преградой вместе с носителем и заносилась во внутренний объем цели типа боевого надводного корабля военно-морских сил (ВМС) США и других союзников.

В связи с этим был рассмотрен истребитель «Мицубиси» А6М «Зеро» («Зики»), который был основным морским истребителем ВМС Японии во Второй мировой войне. Истребители «Зики» оснащались радиальным двигателем воздушного охлаждения, которые до настоящего времени широко применяются в одномоторных поршневых самолетах [8]. Это предопределило их конструктивно-компоновочную схему [9] с практически плоским передним торцом носовой части

фюзеляжа. По этой же причине аналогичную конструктивно-компоновочную схему имели самолеты других типов, которые использовались для камикадзе.

Тогда для расчета ударно-проникающего действия ЛА можно представить в виде эквивалентного цилиндра с диаметром, равным диаметру миделевого сечения фюзеляжа (корпуса) ЛА (рис. 1 [10]).



**Рисунок 1.** Схема цилиндра, эквивалентного истребителя «Мицубиси» А6М «Зеро» (Япония) [10]

При замене ЛА на эквивалентный цилиндрический стержень необходимо определить массу эквивалентного цилиндра. При этом учитывается только масса «сухого» ЛА (без горючего) за вычетом массы крыла и оперения, которые при взаимодействии с преградами могут срезаться и не участвовать в процессе пробития. Рассматриваются самые невыгодные для пробития условия. Также учитывается, что при высокоскоростном ударе ЛА является деформируемым.

Рассмотрим математическую модель соударения цилиндрического стержня, эквивалентного ЛА, с тонкой металлической преградой. В первом приближении на основе квазидинамического подхода [1], где учитывается наряду с прочностным инерционное сопротивление преграды, работа по пробитию тонкой металлической преграды может быть определена следующим образом [10]:

$$W = \frac{1}{2} \pi d h^2 \tau_{td} + \frac{1}{8} \pi d^2 h \rho_t V_0^2 \quad (5)$$

где  $W$  – работа, необходимая для разрушения преграды толщиной  $h$  недеформируемым цилиндром диаметром  $d$  в квазидинамическом приближении;  $\tau_{td}$  – динамический предел текучести материала преграды при сдвиге;  $\rho_t$  – плотность материала преграды;  $V_0$  – скорость удара.

Приравнивая к уравнению (5) кинетическую энергию цилиндра  $E$ , можно получить выражение для баллистического предела при пробитии тонкой металлической преграды. Кроме того, можно получить выражение для максимальной толщины пробиваемой тонкой металлической преграды. Однако, очевидно, что эти выражения справедливы для недеформируемого цилиндра, а ЛА являются деформируемыми при высокоскоростном ударе. При решении аналогичных задач путем численного моделирования с применением метода конечных разностей получено, что работа, затрачиваемая на деформирование и разрушение тонкой металлической преграды, с точностью до 10 % соответствует работе, затрачиваемой на деформирование ударника. Тогда деформирование конструкции ЛА можно учесть следующим образом [10]:

$$W = \frac{E}{2} \quad (6)$$

$$V = 2 \sqrt{\frac{\pi d h^2 \tau_{td}}{2m - \pi d^2 h \rho_t}} \quad (7)$$

$$h_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 d^4 \rho_t^2 V_0^4 + 32 m V_0^2 \pi d \tau_{td} - \pi d^2 \rho_t V_0^2}{8 \pi d \tau_{td}}} \quad (8)$$

$$V_r = \sqrt{V_0^2 - \frac{\pi d h}{m} (2 h \tau_{td} + 0.5 d \rho_t V_0^2)} \quad (9)$$

где  $V$  – баллистический предел;  $m$  – приведенная масса ЛА;  $h_{lim}$  – максимальная (предельная) толщина пробиваемой тонкой металлической преграды;  $V_r$  – остаточная скорость при пробитии преграды.

В работе проведено сравнение результатов расчета по аналитическим зависимостям (8, 9) с экспериментальными данными (верификация) на основании имеющихся в сети Интернет данных о

непробитии [11-13] и пробитии [14, 15] самолетами для камикадзе корабельных преград. Расчетные значения баллистического предела не противоречат имеющимся данным о непробитии или пробитии корабельных преград применительно к одномоторным поршневым самолетам.

Рассмотренные ранее самолеты для камикадзе имеют по сравнению с ракетами гораздо меньшую скорость (до 120 м/с). Поэтому для полноты верификации рассмотрен случай сквозного пробития легкого крейсера «Красный Кавказ» при испытаниях ракеты (самолет-снаряд) КС-1 «Комета» [16, 17]. Результаты расчета остаточной скорости ракеты по формуле (9) подтверждают сквозное пробитие. Причем в результате пробития двух преград у ракеты остается значительный запас кинетической энергии – 67 % (остаточная скорость 275 м/с) от начального значения.

Таким образом, предлагаемый аналитический подход позволяет в первом приближении из энергетических соображений определить возможность пробития или непробития корабельных преград и оценить остаточную скорость деформируемого ударника.

Полученные аналитические зависимости, которые были верифицированы для одномоторных поршневых самолетов и ракеты КС-1 «Комета», применимы также для других ЛА, так как у этих процессов схожая механика.

Предлагаемая методика предварительного расчета реализована следующим образом. Исходные данные для методики:  $M_f$  – масса горючего и окислителя ЛА;  $M_0$  – стартовая масса ЛА;  $V_0$  – маршевая скорость ЛА;  $\sigma_t$  – предел текучести материала преграды;  $h$  – толщина преграды;  $\rho_t$  – плотность материала преграды (для стали  $\rho_t = 7800$  кг/м<sup>3</sup>).

Эти данные могут быть получены из справочников типа [9] или рассчитаны по компоновочным схемам.

Порядок (алгоритм) расчета.

1. Определение диаметра и массы цилиндра, эквивалентного ЛА.

$d$  – диаметр миделевого сечения корпуса ЛА определяем по схеме (контурному чертежу) с учетом масштаба или берем непосредственно из справочных данных.

$$d = \frac{L}{L_d} d_m \quad (10)$$

где  $L$  – длина ЛА;  $L_d$  – длина ЛА по контурному чертежу или компоновочной схеме;  $d_m$  – диаметр миделевого сечения корпуса ЛА по контурному чертежу или компоновочной схеме.

Масса цилиндра, эквивалентного ЛА,  $m$  определяется на основе справочных данных и расчета по компоновочным схемам

$$m = M_0 - M_f - kM_0 \quad (11)$$

где  $k$  – проектный коэффициент, учитывающий массу крыла и оперения, которые могут срезаться при пробитии.

2. Определение скорости удара.

За скорость удара принимаем маршевую скорость  $V_0$ .

3. Определение предела текучести материала преграды при динамическом нагружении.

$\sigma_{td}$  – динамический предел текучести материала экрана при растяжении может быть рассчитан по формуле [18]:

$$\sigma_{td} = 1.25\sigma_t \quad (12)$$

Это соотношение характерно для вязких броневых сталей.

$\tau_{td}$  – динамический предел текучести материала преграды при сдвиге, который рассчитывается по формуле

$$\tau_{td} = \sigma_{td}/\sqrt{3} \quad (13)$$

4. Расчет баллистического предела, максимальной толщины пробиваемой тонкой металлической преграды и остаточной скорости.

Для оценки ударно-проникающего действия ЛА используем выражения на основе квазидинамического подхода для тонких преград (экранов) [1, 2] с учетом деформируемости конструкции ЛА [10] при высокоскоростном ударе (7-9).

Баллистический предел рассчитываем по формуле (7). Если скорость удара  $V_0$  больше баллистического предела  $V$  (т.е.  $V_0 > V$ ), то пробитие, а иначе – непробитие.

Максимальная (предельная) толщина пробиваемой преграды (экрана) рассчитывается по формуле (8). Если толщина преграды  $h$  больше рассчитанной предельной  $h_{lim}$ , (т.е.  $h > h_{lim}$ ), то непробитие, а иначе – пробитие.

Если происходит пробитие, то по формуле (9) может быть рассчитана остаточная скорость ЛА после пробития преграды. Рассчитанная остаточная скорость принимается в качестве скорости удара при воздействии ЛА на следующую преграду (экран) и расчет повторяется.

В работе сформулирована методика, которая позволяет оценить ударно-проникающее действие ЛА, которые в результате чрезвычайных ситуаций или штатного функционирования могут взаимодействовать с тонкими металлическими преградами ( $h/d < 0,5$ ). Проведена верификация методики для разных ЛА (малодеформируемых и деформируемых), имеющих скорости, которые находятся в широком диапазоне (от 79,3 м/с до 315 м/с). Полученные результаты могут быть использованы для предварительных оценок при проектировании защитных сооружений атомных электростанций с использованием металлических экранов, а также при оценке динамики ЛА на участке конечной (терминальной) баллистики.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-08-00701-а)

### Список литературы

1. Томсон В. Приближенная теория пробивания брони // Механика (сб. перев.). 1956. № 1. С.134-139.
2. Brown A. A quasi-dynamic theory of containment // Int. J. Mech. Sci. 1964. Vol. 6. No 4. P. 257-262.
3. German air-to-surface missiles 1939-45 // Military history. URL: [http://militarynavalhistory.net/articles/sakhal/german air-to-surfase missiles 1939-45.php](http://militarynavalhistory.net/articles/sakhal/german_air-to-surfase_missiles_1939-45.php) (дата обращения 23.01.2019).
4. German explosive ordnance (bombs, fuzes, rockets, land mines, grenades and igniters) // Restricted security information. TM 9-1985-2 / TO 39B-1 A-9. United States Government printing office, Washington. 1953. URL: <http://www.scribd.com/doc/67488065/TM-9-1985-2> (дата обращения 23.01.2019).
5. Титушкин С.И. Линейные корабли типа «Витторио Венето» // Издание альманаха «Корабли и сражения». СПб.: ГИПП «Искусство России». 1995.
6. Широкопад А.Б. История авиационного вооружения. Краткий очерк / Под общ. ред. А.Е. Тараса. Мн.: Харвест, 1999. 560 с. URL: <https://www.litmir.me/bd/?b=276316&p=1> (дата обращения 23.01.2019).
7. Линкоры Второй мировой. Ударная сила флота / С.А. Балакин, А.В. Дашьян, С.В. Потянин, М.Ю. Токарев, В.Н. Чаусов. М.: Коллекция: Язуз: ЭКСМО. 2006. 256 с.
8. Макаров Ю.В. Летательные аппараты МАИ. М.: Изд. МАИ. 1994. 256 с.
9. Большая авиационная энциклопедия «Уголок неба». URL: <http://www.airwar.ru/other/draw/> (дата обращения 23.01.2019).
10. Пусев В.И., Марков В.А. Оценка компоновки и ударно-проникающего действия одномоторных поршневых самолетов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2009. № 5-6. С. 68-73.
11. След камикадзе // Livejournal. Мастерок, 26.09.2015. URL: <http://masterok.livejournal.com/2543685.html> (дата обращения 23.01.2019).
12. Mitsubishi Ki-51 Sonia. URL: <http://www.windowsearch-exp.com/images/search?q=Mitsubishi+Ki-51+Sonia&FORM=RETAB> (дата обращения 23.01.2019).
13. Дашьян А.В. Корабли Второй мировой войны. ВМС Великобритании. Ч. 1 // Морская коллекция. Приложение к журналу «Моделист-конструктор». 2003. № 4. URL: <http://wunderwaffe.ru/magazine/MK/2003.04/index.htm> (дата обращения 23.01.2019).
14. USS Hinsdale (APA-120) // NavSource Online: Amphibios photo Archive. URL: <http://www.navsource.org/archives/10/03/03120.htm> (дата обращения 23.01.2019).
15. Десантные транспорты. Специальные десантные транспорты. URL: <http://www.istrima.com/orujievtoroi-mironoi-voiny/nac> (дата обращения 23.01.2019).

16. Платонов А.В. Энциклопедия советских надводных кораблей, 1941-1945. СПб.: ООО «Изд-во «Полигон». 2002. 750 с.
17. Крылатая ракета КС-1 «Комета» // Информационно-новостная система «Ракетная техника». URL: <http://rbase.new-factoria/missile/wabb/КС-1.shtml> (дата обращения 23.01.2019).
18. Lethaby J.W., Skidmore I.C. The deformation and plugging of thin plates by projectile impact // Mech. Properties High Rate Strain. Proc. Conf. Oxford. 1974. № 21. P. 429-441.

### BALLISTIC LIMIT OF A PROJECTILE IMPACTING A THIN METAL BARRIER AT A HIGH VELOCITY

*A.M. Kuslya<sup>1</sup>, V.A. Markov<sup>2</sup>, Yu.V. Popov<sup>2</sup>, V.I. Pusev<sup>2</sup>, S.I. Sytchev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Tactical Missiles Corporation JSC, Moscow region, Korolev, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The paper uses a quasi-dynamic approach to computing impact-driven penetration effects. Then for nondeformable (poorly deformable) penetrators of an ogive-cylindrical form we may write the target fracture energy thin barriers ( $h/d < 0.5$  ( $h, d$  are the barrier thickness and projectile diameter, respectively)) as [1, 2]:

$$W = \pi R^2 h \left[ \frac{1}{2} \sigma_{td} + \frac{1}{16} \rho_t \pi^2 \left( \frac{V_0 R}{L} \right)^2 \right] \quad (1)$$

where  $W$  is the target fracture energy;  $R$  is the penetrator radius;  $h$  is the target thickness;  $\sigma_{td}$  is the dynamic tensile strength of the target material;  $\rho_t$  is the target material density;  $V_0$  is the impact velocity;  $L$  is the length of the ogive section.

By equating the energy from the expression (1) to the kinetic energy of the penetrator, we derive expressions for determining the limit thickness of the target to be perforated, the ballistic limit and the residual velocity:

$$h_{lim} = \frac{8m_a V_0^2 L^2}{\pi R^2 (8\sigma_{td} L^2 + \rho_t \pi^2 V_0^2 R^2)} \quad (2)$$

$$V = 2RL \sqrt{\frac{2\pi h \sigma_{td}}{(8m_a L^2 - \pi^3 h R^4 \rho_t)}} \quad (3)$$

$$V_r = \sqrt{V_0^2 - \frac{\pi R^2 h}{m_a} \left[ \sigma_{td} + \frac{1}{8} \rho_t \pi^2 \left( \frac{V_0 R}{L} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

where  $m_a$  is the penetrator mass;  $h_{lim}$  is the limit thickness of the target to be perforate;  $V$  is the ballistic limit;  $V_r$  the residual velocity of the penetrator after target perforation.

This quasi-dynamic approach makes it possible to account for strength and inertial resistance of the target. As any other computational model, this approach requires comparing the results of the calculations with experimental data (in other words, validation). To validate the model, we chose the most successful use of the first guided bomb, PC-1400 FX (Fritz X) (Germany [3]), against the battleship Roma (of the Vittorio Veneto class, Italy), causing the battleship to sink. According to a US technical report [4], Fritz X, the world's first guided bomb, had a diameter of 558.8 mm and its total mass was approximately 1650 kg.

The first guided bomb perforated the ship and exploded in the water underneath the hull. The second guided bomb exploded inside the ship and sank it. We used [5-7] to design the target layouts required to compute the effects of a guided bomb. Vittorio Veneto class battleships used heavy homogeneous armour of the AOD type and heavy-duty structural ER steel [7].

We must emphasise that the relative thicknesses of the barriers perforated are either low ( $h/d < 0.5$ ) or very low ( $h/d < 0.1$ ), and the total target thicknesses all lie in the range of thin barriers ( $h/d < 0.5$ ). It is possible to compute the time it takes for the guided bomb to move inside the ship, taking into account velocity losses incurred during target penetration. The barrier perforation time is relatively low; disregarding it, we obtain the delay time of the fuse installed in the guided bomb:  $t_1 > 0.082$  s (motion in