

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЛУБИНЫ БРОНЕПРОБИТИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ

*Голомидов Филипп Олегович (FOGolomidov@vniief.ru), Краюхин Сергей Андреевич,
Трунова Злата Дмитриевна, Бурцев Владимир Викторович, Циберев Кирилл Владимирович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе описывается реализация инженерной методики для оценки глубины бронепробития кумулятивной струей. Методика реализована с целью расширения функциональных возможностей пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС. Изложены основные положения методики. Представлен алгоритм определения параметров кумулятивной струи. Приводится описание программной реализации алгоритма сглаживания и выборки диапазона данных, описывающих параметры кумулятивной струи. Работоспособность реализованных алгоритмов продемонстрирована сравнением задач по прямому численному моделированию процесса формирования кумулятивной струи и оценке бронепробития средствами инженерной методики.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, инженерная методика, кумулятивная струя.

AN ENGINEERING METHOD TO ESTIMATE THE DEPTH OF ARMOR PENETRATION BY SHAPED-CHARGE JETS

*Golomidov Filipp Olegovich (FOGolomidov@vniief.ru), Krayukhin Sergey Andreevich,
Trunova Zlata Dmitrievna, Burtsev Vladimir Viktorovich, Tsiberev Kirill Vladimirovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper describes an implementation of an engineering method to estimate the depth of armor penetration by shaped-charge jets. The method has been implemented to expand the functionality of the Logos engineering analysis and supercomputer simulation software package. Basic concepts of the method are discussed. An algorithm for determining shaped-charge jet parameters is presented. Software implementation of a smoothing and jet data range sampling algorithms is described. Performance of the algorithms is demonstrated by direct numerical simulations of shaped-charge jet formation and armor penetration using the proposed engineering method.

Key words: software package LOGOS, engineering method, shaped-charge jet.

Введение

В настоящее время в ИТМФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разрабатывается многофункциональный пользовательский пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС [1]. С целью развития его функциональных возможностей в рамках программного модуля ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ [2] был реализован эйлеров этап (предназначенный для решения задач на неподвижных конечно-элементных сетках) с расчетом контактных границ методом концентраций, а также не-

которые модели кинетики детонации и разрушения. Областью применения новых возможностей является решение задач, реализующих высокоскоростные течения сплошной среды с большими деформациями при ударно-волновом нагружении.

Примером такого класса задач являются задачи по моделированию процессов формирования кумулятивных струй и бронепробития. Глубина бронепробития является одной из основных характеристик кумулятивного заряда.

Можно выделить два основных подхода по оценке глубины бронепробития:

1. Подход, основанный на прямом численном моделировании.

2. Инженерный подход, рассматриваемый в данной работе.

Одним из первых инженерных методов расчета кумулятивных зарядов (КЗ), получившим широкое распространение, был метод Л. П. Орленко [3]. Суть метода заключалась в следующем: заряд, содержащий облицовку, набором сечений, перпендикулярных оси, разбивался на слои. В каждом слое (независимо от остальных) вычислялась скорость облицовки. Затем по известным скоростям находились углы схлопывания облицовки, и по формулам гидродинамической теории (формулы М. А. Лаврентьева [4]) – скорости и массы каждого элемента струи.

Ниже приведены основные положения предлагаемой к использованию методики расчета пробивания брони кумулятивной струей в основу которой лег метод Л. П. Орленко.

Описание методики расчета глубины бронепробития для кумулятивных снарядов

В качестве входных данных для методики используются следующие параметры кумулятивной струи:

- t – время формирования данного сечения струи (мксек);
- X_ϕ – координата точки формирования данного сечения струи (мм);
- W – средняя по сечению продольная скорость струи (км/сек);
- ρ_j – плотность струи на выходе из зоны формирования (г/см^3);
- $r_j dz = q \cdot dl$ – радиус струи на выходе из зоны формирования (мм);
- V_r – средняя по сечению радиальная скорость струи (км/сек).

Эти данные могут быть получены как методами численного моделирования, так и в рамках инженерных методик. В данной работе параметры кумулятивной струи получены путем численного моделирования.

Расчет процесса пробивания основывается на формулах гидродинамической теории с поправками на прочность преграды. При этом записываются следующие соотношения между длиной элемента струи в момент подлета к преграде (dl) и величиной пробивания (dz):

$$dz = q \cdot dl, \quad (1)$$

где $q = \frac{u_x}{W - u_x}$,

$$\frac{u_x}{W} = \frac{q_0}{q_0^2 - 1} \cdot \left(q_0 - \sqrt{1 + (q_0^2 - 1) \cdot \frac{2H_d}{\rho_{\text{пр}} \cdot W^2}} \right), \quad (2)$$

причем, если $q_0 = 1$, то

$$\frac{u_x}{W} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2H_d}{\rho_{\text{пр}} \cdot W^2} \right), \quad (3)$$

где W – скорость струи (км/сек); u_x – скорость проникания струи в преграду (км/сек);

$$q_0 = \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_{\text{пр}}}}, \quad (4)$$

ρ_j – плотность струи (г/см^3); $\rho_{\text{пр}}$ – плотность преграды (г/см^3); H_d – динамическая твердость материала преграды (ГПа).

Обычно предполагается, что после того как струя сформировалась, давление в струе равно нулю и, следовательно, каждый элемент струи движется по инерции равномерно и прямолинейно.

Для удлинения струи на стадии кинематического растяжения можно записать:

$$n_{\text{кин}} = \frac{dl}{dl_0} = 1 - \frac{F + x + z}{W} \cdot \frac{dW}{dl_0}, \quad (5)$$

где dl_0 – начальная длина элемента струи; F – расстояние от торца КЗ до преграды; x – расстояние от торца КЗ до точки формирования струи; z – глубина пробития к моменту соударения данного элемента струи с преградой; dW/dl_0 – градиент скорости струи в момент формирования.

По достижению некоторого предельного растяжения струя рвется, и каждый элемент струи летит дальше, уже не растягиваясь. Для величины предельного растяжения обычно применяют эмпирические соотношения. В данной работе используется формула, в которую параметры струи входят в степени 2/3:

$$n_{\text{пред}} = D \cdot \left(r_0 \cdot \frac{dW}{dl_0} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

где r_0 – радиус струи в момент формирования; A, B, D – численные коэффициенты, получаемые из сравнения расчета с экспериментом.

Формула (6) удобна тем, что, как может быть показано после некоторых преобразований, глубина пробивания отрезком струи с перепадом скоростей ΔW не зависит от градиента, а только от полной массы струи в этом интервале.

Для определения диаметра пробиваемого отверстия используется энергетический подход:

$$E_{\text{струи}} = A \cdot V_{\text{крат}}, \quad (7)$$

где $E_{\text{струи}}$ – кинетическая энергия струи; $V_{\text{крат}}$ – объем пробиваемого кратера; A – удельная работа вытеснения единицы объема материала.

Обычно в расчетах пробития полубесконечной преграды из броневой стали используется значение $A = 6 \text{ кДж/см}^3$.

Как отмечается в работе [5], работа вытеснения материала преграды (значение A), кроме свойств материала преграды, зависит также от расстояния до свободной поверхности. Величина A плавно уменьшается в 2 раза на глубине ~ 20 диаметров струи, что будет приводит к увеличению радиуса кратера вблизи поверхности.

Уравнение (6) удобнее интегрировать, если перейти от интегрирования по dl_0 к интегрированию по dW в пределах от $W_{\text{пред}}$ до W_{min} .

Под величиной $W_{\text{пред}}$ мы понимаем ту максимальную эффективную скорость струи, начиная с которой обеспечивается классическое (по Лаврентьеву) бронепробитие, в отличие от величины W_{max} , которая есть просто максимальная скорость струи независимо от ее состояния.

Значение W_{min} определяется точностью изготовления заряда.

Для учета асимметрии КЗ в методику вводится параметр $V_{\text{бок}}(W)$, это скорость смещения струи в сторону от оси в зависимости от ее продольной скорости.

Алгоритм определения параметров струи

Для определения параметров струи необходимо для методики, описанной в предыдущем разделе, используется численное моделирование.

Существует две методики расчета бронепробития. В одной из них используются параметры элементов струи, полученные в момент их формирования. В другой – параметры, полученные при пролете струи через какое-либо заданное сечение. В данной работе рассматривается методика, использующая параметры на момент формирования струи.

Под моментом формирования элемента струи понимается такой момент, когда элемент вышел из области формирования и набрал ту окончательную скорость, с которой он и продолжает двигаться дальше. Это означает, что разность давлений на его границах снижается до достаточно малых значений.

Элемент считается сформировавшимся, как только давление упадет ниже некоторого значения P_0 .

Таким образом, алгоритм поиска точки формирования в заданный момент времени сводится к следующему:

1. В осевой строчке необходимо найти точку максимального давления ($P_{\text{max}}, X_{\text{max}}$).

2. От точки X_{max} необходимо двигаться в сторону головы струи и искать первую точку, в которой $P \leq P_0$. Найденное значение $X_{\text{ф}}$ назовем точкой формирования струи, и в этом сечении (столбце) будут вычисляться величины, характеризующие струю:

- t – момент времени формирования данного сечения струи (мксек);
- $X_{\text{ф}}$ – координата X формирования данного сечения струи (мм);

$$W = \frac{\sum_i m_i \times n_{Mi} \times u_{xi}}{\sum_i m_i \times n_{Mi}}$$

• – средняя скорость струи в данном сечении (км/сек);

• $m = \sum_i m_i \times n_{Mi}$ – масса области, по которой идет усреднение (Γ);

• m_i – масса ячейки, n_{Mi} – массовая концентрация вещества струи в ячейке.

Для сглаживания результатов усреднение ведется не по одному столбцу, а по нескольким с номерами $k = k_{\text{ф}} \pm \delta$, где δ – задаваемая константа $\delta = 0, 1, 2, \dots$

Суммирование в столбцах идет от оси до первой точки, не содержащей материала струи.

Данный подход хорош для сплошных струй, для раздробленных (содержащих пустоты внутри себя) он может давать неправильные результаты. Поэтому, как вариант, можно рассмотреть суммирование по всем точкам столбца внутри заданного коридора Y_{max} . В двумерном случае величину Y_{max} можно оценить до проведения расчета.

Границу струи можно определять по критерию, когда несколько точек подряд (3, 5...10) не содержат вещества струи.

$$V = \sum_i V_i \times n_{vi} \text{ – объем области, по которой идет}$$

усреднение (см^3), где V_i – объем ячейки, n_{vi} – объемная концентрация вещества струи в ячейке.

$\rho = \frac{m}{V}$ – средняя плотность струи в данном сечении (г/см^3).

$$m_i = \frac{m}{l} \text{ – масса струи на единицу длины (г/см),}$$

где l – длина области (вдоль оси струи), по которой идет суммирование.

$r = \sqrt{\frac{m_i}{\pi \rho}}$ – радиус струи в момент формирования (см).

$$U_r = \frac{\sum_i m_i \times n_{Mi} \times u_{yi}}{\sum_i m_i \times n_{Mi}} \text{ – средняя скорость струи}$$

в данном сечении (км/сек).

Описание программной реализации

Накопление необходимых параметров струи происходит в процессе проведения расчета.

Далее приводится описание накапливаемых величин и их соответствие величинам, описанным в предыдущем разделе:

$step$ – номер счетного шага для момента времени $time$;

$time$ – момент времени формирования данного сечения струи (мксек);

x_{form} – координата X формирования струи (мм);

p_{form} – фактическое значение давления в точке формирования (ГПа);

$x_{p_{max}}$ – X -координата ячейки с максимальным давлением (мм);

p_{max} – значение максимального давления в области формирования (ГПа);

$u_{x_{sr}}$ – средняя скорость струи в данном сечении (км/сек);

$u_{y_{sr}}$ – средняя радиальная скорость струи в данном сечении (км/сек);

$mass_l$ – масса струи, приходящаяся на единицу длины (г/см);

ro_{sr} – средняя плотность струи в данном сечении (г/см³);

rad – радиус струи в данном сечении (мм);

du – градиент скорости вдоль струи;

Для задания параметров накоплений в программном модуле ЛОГОС-ПРЕПОСТ [6] в рамках прочностной модели создан приказ «Запись накапливаемых результатов», пользователю станет доступен выпадающий список «Типы накоплений», где необходимо задать тип накоплений «INF_KS_FORM_2D», т. е. накопление результатов в точке формирования струи.

На рис. 1 представлены параметры необходимые для задания при накоплении результатов в точке формирования струи.

В результате расчета формируется текстовый файл, в котором хранится таблица накоплений.

Данные из файла с накоплениями используются в качестве входных для инженерной методики оценки пробития брони кумулятивной струей. Сама процедура расчета глубины бронепробития состоит из нескольких этапов, представленных в виде схемы на рис. 2.

На текущий момент инженерная методика реализована в виде вспомогательной программы, вызов которой осуществляется вне интерфейса препостпроцессора. Для запуска в качестве входных параметров программе необходимо подать путь к файлу с накоплениями и параметры расчета.

В качестве параметров расчета для оценки глубины бронепробития кумулятивного заряда необходимо задать следующие поля:

- критическая скорость разлета струи (скорость после которой струя считается разлетевшейся и перестает существовать);
- расстояние от начала координат до преграды (при условии, что геометрическая модели, для которой проводилось снятие накопления находится в начале координат, в противном случае отсчет необходимо вести от X = координате в которой расположено начало геометрической модели);
- плотность струи.

Параметр	Значение
Приказ	Запись накапливаемых результатов
Типы накопления:	INF_KS_FORM_2D;
☐ Определение параметров струи на момент формирования в двумерном случае	
Направление движения струи	
Номер материала облицовки	1
Критическое давление формирования струи	0
Минимальная координата X зоны формирования струи	0
Максимальная координата X зоны формирования струи	0
Максимальная координата Y для зоны движения струи	0
Число столбцов для усреднения	0

Рис. 1. Параметры для накопления результатов в точке формирования струи

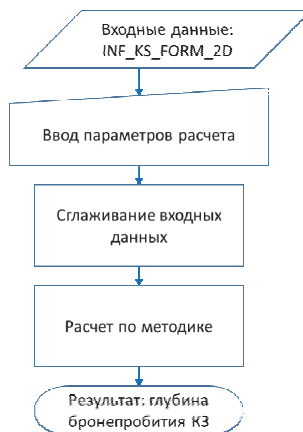


Рис. 2. Блок-схема прикладной программы для расчета глубины бронепробития по инженерной методике

Сглаживание исходных данных

Для сглаживания данных, полученных в результате накопления величин реализована процедура сглаживания данных по принципу «скользящая средняя». Необходимость сглаживания данных обусловлена наличием осцилляций в исходных данных. Данная процедура позволяет убрать зависимость в исходных данных от степени дискретизации счетной сетки. Данную процедуру также можно разделить на два этапа. В качестве первого этапа выполняется сглаживание данных, на втором этапе происходит выделение нужного для методики диапазона данных. На рис. 3 показана зависимость скорости струи от времени до сглаживания и после.

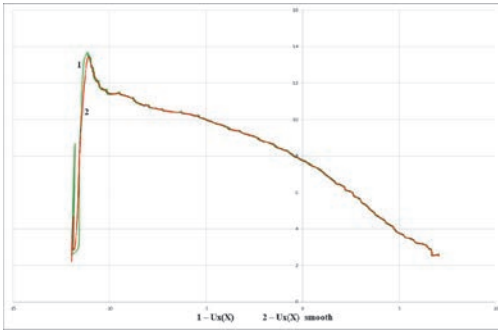


Рис. 3. Сравнение значений скорости струи от времени в точке формирования до и после работы алгоритма сглаживания: 1 – Ux[X], 2 – Ux[X]_smooth

После того как данные сглажены, в работу вступает алгоритм выборки диапазона значений необходимых для проведения расчетов по методике. Для методики используются данные полученные после того как скорость достигла максимального значения и начинает гаснуть. Соответственно алгоритм находит максимальное значение скорости и отсеивает данные в таблицах, до индекса данного элемента в массивах. На рис. 4 представлен график зависимости скорости струи от времени, полученный после выборки данных необходимых для работы методики.

После запуска расчета по инженерной методике пользователю на экран выводится результат расчета глубины пробития в сантиметрах.

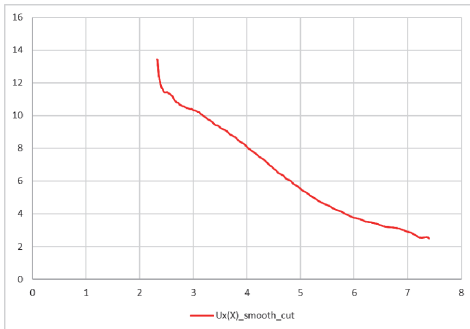


Рис. 4. График зависимости скорости струи от времени, полученный после выборки данных необходимых для работы методики

Верификация методики на тестовых примерах и результаты расчетов глубины пробития преграды кумулятивным снарядом

При использовании инженерного подхода в отличие от прямого численного моделирования взаимодействия кумулятивной струи с преградой, необходимо проводить только моделирование процесса кумулятивного взрыва и формирования кумулятивной струи, что существенно сокращает время проведения расчета.

Для проверки работоспособности реализованных алгоритмов в программном модуле ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ проведено численное моделирование процесса формирования и эволюции кумулятивной струи для снаряда калибром 147 мм с геометрической формой облицовки рупор.

Данный расчет проводился в двух постановках. Первая без преграды, данный расчет проводился для формирования накоплений в точке формирования струи. И вторая постановка, с преградой, для сравнения и верификации результатов, полученных по инженерной методике.

На рис. 5 представлена начальная геометрия кумулятивного снаряда (КС) калибром 147 мм.

КС состоит из медной облицовки, кольцевого детонационного распределителя из ВВ ТЭН с $\rho = 1,525 \text{ г/см}^3$ ($D = 7,82 \text{ кс/с}$; $Q = 5,7 \text{ кДж/г}$) и снаряжен ВВ на основе октогена с $\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$ ($D = 8,86 \text{ кс/с}$; $Q = 6,39 \text{ кДж/г}$). Для расчета ВВ использовались уравнение идеального газа с $\gamma=3$.

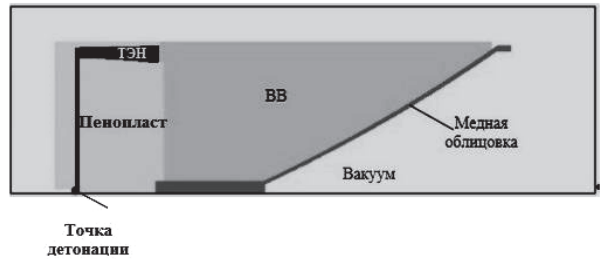


Рис. 5. Геометрия задачи

Инициирование детонации осуществлялось в начальный момент в точке, обозначенной черным на рис. 5. Для моделирования распространения детонации использовался пошаговый алгоритм контроля скорости детонации [7].

Расчеты двумерной осесимметричной задачи проводились на эйлеровой сетке со стороной ячейки 0,04 см. Общее число точек в задаче составило примерно 1,2 млн.

На рис. 6 показана начальная геометрия кумулятивного снаряда без преграды, на рис. 7 показана начальная геометрия кумулятивного снаряда со стальной полубесконечной преградой.



Рис. 6. Начальная геометрия задачи без преграды



Рис. 7. Начальная геометрия задачи со стальной полубесконечной преградой



Рис. 8. Форма отверстия в стальной броне, полученная прямым численным моделированием

Для проведения расчетов по инженерной методике использовались следующие параметры:

- критическая скорость разлета струи равна 0,08 км/сек;
- расстояние от $X=0$ до преграды бралось равным 25 см;
- значение плотности струи для медной воронки бралось равным $9,0 \text{ г/см}^3$.

Параметры «расстояние до преграды» (фокусное расстояние) и «плотность струи» берутся из постановки конкретной задачи. Параметры «боковая скорость» и «критическая скорость разлета струи» были подобраны исходя из накопленного опыта применения во ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» инженерного подхода при расчете кумулятивных зарядов различного калибра с опорой на экспериментальные данные.

В результате расчета по инженерной методике глубина бронепробития при фокусном расстоянии равном 25 см составила $\sim 85,5$ см. При прямом численном моделировании глубина бронепробития составила ~ 86 см, как показано на рис. 8.

На представленной тестовой задаче оценка глубины бронепробития, полученная по инженерной методике, хорошо согласуется с результатами прямого численного моделирования. Погрешность в оценке глубины бронепробития составила менее 1 %.

Важно отметить, что применение инженерного подхода для оценки глубины бронепробития кумулятивным зарядом позволяет существенно сократить сроки проведения расчетов, т. к. исключает необходимость моделирования работы кумулятивного снаряда при взаимодействии с преградой. Т. е., достаточно провести моделирование работы боеприпаса в геометрической постановке, в которой отсутствует преграда до момента формирования струи и задать параметр для генерации накоплений данных в точке формирования струи. При этом применение инженерного подхода для оценки глубины бронепробития кумулятивным зарядом позволяет получить оценочное значение глубины пробития преграды из бронированной стали, которая является предварительной оценкой. Для окончательного вывода о глубине бронепробития необходимо проведение прямого численного моделирования.

Список литературы

1. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Полищук С. Н., Лашкин С. В., Жучков Р. Н., Глазунов В. А., Яцевич С. В., Курулин В. В. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса // Препринт № 111. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, С. 67.
2. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 1. С. 3–14.
3. Физика взрыва. Издание второе. / Под редакцией К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
4. Лаврентьев М. А. Успехи математических наук. 1957. Вып. 4.
5. Физика взрыва. Т. 2. Издание третье. / Под редакцией Л. П. Орленко. М: ФИЗМАТЛИТ. 2002.
6. Анищенко А. А., Дерюгин В. И., Дюпин В. Н. и др. Препостпроцессор ЛОГОС-ПРЕПОСТ. Архитектура уровня бизнес-логики. Хранения, импорт и экспорт данных // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 2. С. 78–82.
7. Володина Н. А., Краюхин С. А. Алгоритм итерационной коррекции времен детонации за счет учета направления движения детонационной волны в методике ЛЭГАК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 3. С. 35–47.