

ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ОБЛИЦОВОК

Я.М. Никольская

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В предыдущих работах [1-2] на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред были проанализированы различные варианты комбинированных кумулятивных облицовок (КО) со струеобразующей частью в форме усеченных сферы и эллипсоида переменной толщины и отсекающей частью в форме цилиндра (СЦ-облицовки) (рис. 1), позволяющие формировать компактный элемент со скоростями в диапазоне 7,5...10 км/с.

Для определения закономерности изменения скорости формируемого взрывом компактного элемента и построения инженерных зависимостей указанных величин, были использованы методы регрессионного анализа. Для того, чтобы получить зависимость скорости от основных геометрических параметров комбинированной КО, были определены независимые геометрические параметры и оценено их влияние на скорость компактного элемента.

Рассматривался случай комбинированной КО со струеобразующей частью полуэллипсоидальной формы переменной толщины. Для данного случая разнотолщинность головной части комбинированной облицовки может быть задана с помощью соответствующих осей полуэллипсов внутренней и внешней поверхностей облицовки. Таким образом, можно выделить пять независимых геометрических параметров облицовки при варьировании которых изменяется соответствующим образом и степень разнотолщинности струеобразующей части КО: R_s , R_z , δ_1 , δ_2 , h_c (рис. 1).

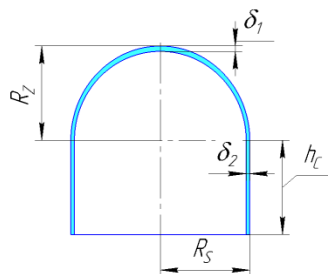


Рисунок 1. Схема комбинированной кумулятивной СЦ-облицовки

При функционировании комбинированной КО в составе метательного устройства (МУ) формируется высокоскоростной компактный элемент (ВКЭ), причем массово-скоростные характеристики данного ВКЭ зависят как от материалов КО, конструкции МУ, так и от приведенных выше геометрических параметров (рис. 2). Для определения данной зависимости проведен регрессионный анализ массива полученных в результате численных расчетов данных. Необходимо отметить, что построение регрессионной модели сводится к определению влияния каждого фактора в конечное значение скорости формируемого элемента.

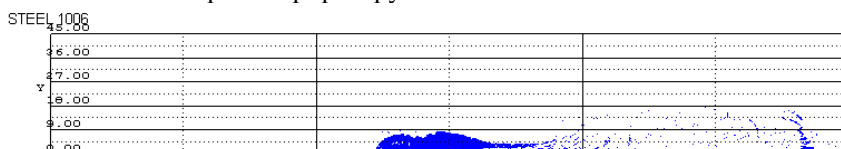


Рисунок 3. Процесс формирования ВКЭ при функционировании МУ с комбинированной КО

Для того, чтобы определить инженерную зависимость скорости формируемого взрывом компактного элемента от указанных независимых геометрических параметров комбинированной КО, была проведена оценка влияния отдельно взятого соответствующего параметра на скорость и массу формируемого компактного элемента. После проведения соответствующих расчетов получено, что изменение скорости компактного элемента при варьировании отдельно взятого независимого конструктивного параметра КО при сохранении остальных параметров неизменными возможно описать линейной функцией (рис. 4).

Так как влияние каждого отдельного параметра можно описать линейной зависимостью, то для определения инженерной формулы скорости формируемого элемента были применены методы регрессионного анализа с описанием итогового уравнения для скорости компактного элемента линейной регрессионной зависимостью.

В первую очередь был проведен корреляционный анализ, позволяющий выявить наличие статистически значимых связей между переменными и оценкой степени их тесноты. После этого был осуществлен переход к математическому описанию конкретного вида зависимостей с использованием регрессионного анализа.

Для проверки правильности полученных коэффициентов регрессионного анализа была проведена проверка значения коэффициента детерминации R^2 . В полученных результатах коэффициент детерминации R^2 не менее 0,774, что означает, что 77,4% общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных признаков R_s , R_z , δ_1 , δ_2 , h_c . Далее была проведена проверка значения коэффициента множественной корреляции, отражающего тесноту связи между переменной скорости $V_{ВКЭ}$ и факторными признаками. Коэффициент множественной корреляции более $R = \sqrt{R^2} = 0,88$, что означает, что выбранные факторы R_s , R_z , δ_1 , δ_2 , h_c существенно влияют на значение скорости формируемого компактного и данный фактор подтверждает правильность их включения в модель.

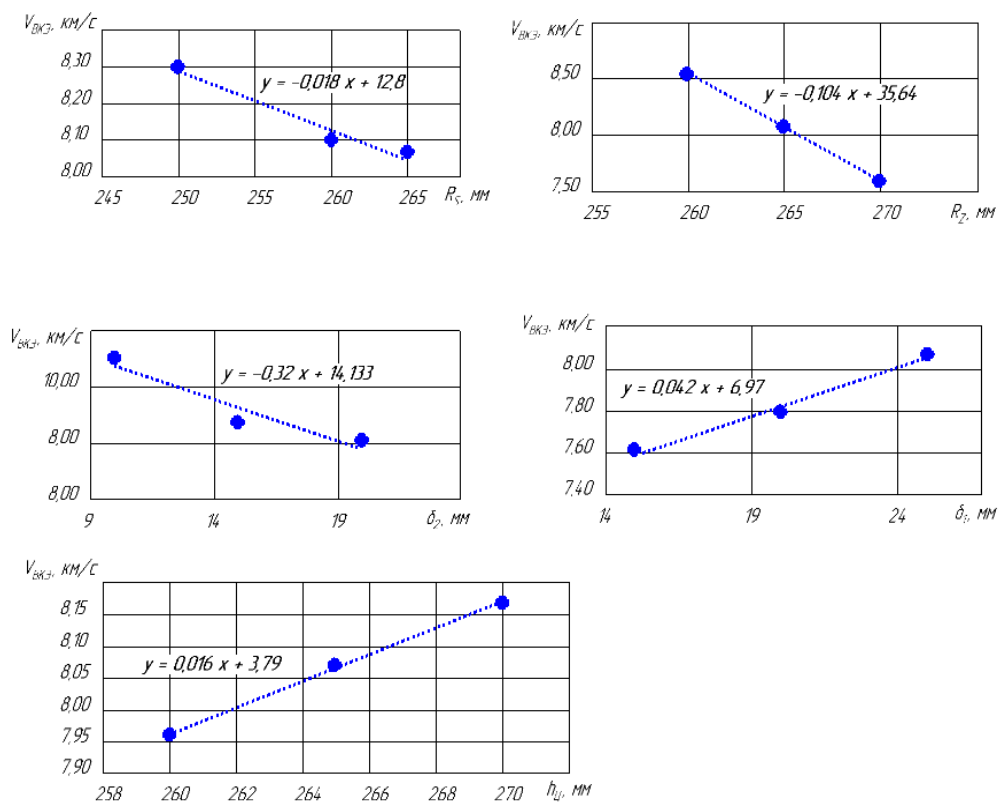


Рисунок 4. Определение характера влияния параметров на скорость ВКЭ

Таблица 1. Результаты регрессионного анализа для скорости ВКЭ

№ п/п	Наименование параметра регрессионного анализа	Значение
1.	Множественный R	0,88
2.	R ²	0,774
3.	Нормированный R ²	0,74
4.	Стандартная ошибка	0,022
5.	Наблюдения	29

Проверка значимости уравнения регрессии была проведена на основе сравнения расчетного и табличного значения F – критерия Фишера. В соответствии с тем, что полученное расчетное значение критерия Фишера больше табличного значения, следовательно, уравнение регрессии для скорости ВКЭ для выбранных независимых параметров является значимым. После определения значимости уравнения регрессии и определения значимости каждого отдельно взятого независимого параметра по критерию Стьюдента было проведено определение коэффициентов уравнения регрессии.

Таким образом, по результатам регрессионной статистики и выбора по среднему отклонению между расчетными значениями и значениями, полученными по регрессионным зависимостям, для расчета скорости ВКЭ получено уравнение регрессионной зависимости для определения скорости V_{ВКЭ} формируемого компактного элемента, в виде:

$$V_{ВКЭ} = (\alpha R_s + \beta R_z + \eta \delta_2 + \mu \delta_1) \frac{D}{d_3} + \eta D,$$

где V_{ВКЭ} – расчетная скорость ВКЭ, км/с; D – скорость детонации, км/с; d₃ – внешний диаметр заряда ВВ, мм; α, β, η, μ, η – безразмерные коэффициенты регрессионной зависимости; R_s, R_z, δ₁, δ₂, – задаваемые конструктивные параметры комбинированной облицовки «эллипсоид дегрессивной толщины-цилиндр».

По результатам регрессионного анализа получены следующие значения коэффициентов регрессионной зависимости:

$$\alpha = -1,56; \beta = 5,02; \eta = -8,03; \mu = 5,44; \eta = 2,78$$

Границы применимости формул определяются диапазонами изменения соответствующих параметров:

$$0 \leq \frac{R_s}{d_3} \leq 1; \quad 0 \leq \frac{\delta_1}{\delta_2} \leq 3; \quad 0 \leq \frac{R_z}{d_3} \leq 1;$$

Для выбранной конструкции КО также был проведен регрессионный анализ для определения инженерной зависимости для оценки массы формируемого ВКЭ (табл. ____). Для выбора линейного вида регрессионной зависимости по аналогии было определено влияние каждого независимого параметра на массу головной части формируемого струйного течения материала.

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа для массы ВКЭ

№ п/п	Наименование параметра регрессионного анализа	Значение
1.	Коэффициент детерминации R ²	0,95
2.	Коэффициент множественной корреляции R	0,90
3.	Табличный критерий Фишера	2,63
4.	Критерий Стьюдента	2,06

В результате, полученное уравнение массы головной части формируемого струйного течения имеет следующий вид:

$$m_{\text{ВКЭ}} = (\alpha'R_s + \beta'R_z + \gamma'\delta_2 + \eta'\delta_1 + \mu'h_{\text{ц}}) \rho_{\text{КО}} d_3^2 \cdot 10^{-6} ,$$

где $m_{\text{ВКЭ}}$ – расчетная масса ВКЭ, г; $\rho_{\text{КО}}$ – плотность КО, кг/м³; d_3 – внешний диаметр заряда ВВ, мм; α' , β' , γ' , η' , μ' – безразмерные коэффициенты регрессионной зависимости; R_s , R_z , δ_2 , δ_1 , $h_{\text{ц}}$ – задаваемые конструктивные параметры комбинированной облицовки.

По результатам регрессионного анализа были получены следующие значения коэффициентов: $\alpha' = 0,42$, $\beta' = -0,69$, $\gamma' = -0,332$, $\eta' = 0,983$, $\mu' = -0,346$. Границы применимости формул соответствуют границам применимости для регрессионной зависимости скорости ВКЭ:

$$0 \leq \frac{R_s}{d_3} \leq 1; \quad 0 \leq \frac{\delta_1}{\delta_2} \leq 3; \quad 0 \leq \frac{R_z}{d_3} \leq 1.$$

Полученные результаты справедливы для облицовок комбинированной формы эллипсоид-цилиндр дегрессивной толщины.

Таким образом, с помощью регрессионного анализа определены теоретические зависимости, описывающие закономерности изменения скорости и массы головной части струйного течения материала для различных геометрических параметров комбинированной КО.

Список литературы

1. Баянова Я.М., Федоров С.В., Ладов С.В. Численный анализ влияния геометрических параметров профилированной кумулятивной облицовки на формирование высокоскоростного компактного элемента// Труды междунар. конф. «XIII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011 – с. 525-531.
2. Баянова Я.М., Федоров С.В., Ладов С.В. Сравнительный анализ результатов численного моделирования формирования взрывом высокоскоростных компактных элементов при использовании комбинированных кумулятивных облицовок// Труды междунар. конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения» – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015 , с. 529-533.
3. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Л.: Физматгиз, 1962, 352 с.

АНАЛИЗ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ИЗ РИФЛЕННЫХ ОБЛИЦОВОК

С.С. Рассоха, С.В. Ладов, А.В. Бабкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Кумулятивные заряды (КЗ), которые вращаются вокруг своей оси симметрии с частотой в диапазоне $10^1 \dots 10^3$ об/с, пробивают отверстия меньшей глубины, чем такие же заряды без вращения [1-3]. Причина этого заключается в том, что в процессе схлопывания кумулятивная облицовка (КО) уменьшает свой радиальный размер и, в соответствии с законом сохранения момента импульса, увеличивает угловую скорость вращения кумулятивной струи (КС) до величины $\sim 10^5$ об/с [2, 3]. Из-за столь большой угловой скорости центробежная сила инерции в КС начинают превышать