

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСКОЛКОВ И ИХ  
ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ**

<sup>1</sup>Кондратова А.И., <sup>2</sup>Шварц М. С., <sup>3</sup>Литус И.Б.

<sup>1</sup>НТИ (филиал) УрФУ, «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» Нижнетагильский технологический институт (филиал,) Нижний Тагил, Россия (622031 Россия, г.Нижний Тагил, ул.Красногвардейская, 59), e-mail: morganakai5@gmail.com

<sup>2</sup>БГТУ "ВОЕНМЕХ", "Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова", Санкт-Петербург, Россия (190005, ул. Красноармейская д.1), e-mail:maks.shvarts.92@mail.ru

<sup>3</sup>ФКП «Нижнетагильский институт испытания металлов», Нижний Тагил, Россия (622015, Россия, г.Нижний Тагил, ул. Гагарина, 29) e-mail: litusigor2014@gmail.com

**Аннотация:** Настоящая статья посвящена разработке методики последовательного применения современных программно-аппаратных комплексов с целью создания виртуальных прототипов фрагментов нерегулярной формы. Рассматривается применение обратного инжиниринга. Актуальностью разрабатываемого метода является определение аэродинамических и поражающих действий фрагментов нерегулярной формы в различных проекциях и с большим диапазоном скоростей, что не всегда удается получить экспериментальными методами.

Ключевые слова: фрагменты нерегулярной формы; обратный инжиниринг; баллистические свойства.

**DEVELOPMENT OF METHODOLOGY OF APPLICATION OF NUMERICAL  
MODELING TO DETERMINE THE BALLISTIC PROPERTIES OF FRAGMENTS  
AND THEIR DAMAGING ACTIONS**

<sup>1</sup>Kondratova A.I., <sup>2</sup> Schwartz M. S., <sup>3</sup>Litus I.B.

<sup>1</sup>NTI (branch) UFU, "Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin" Nizhny Tagil technological Institute (branch) Nizhny Tagil, Russia (Russia 622031, Nizhni Tagil, street Krasnogvardejsky, 59), e-mail: morganakai5@gmail.com

<sup>2</sup>BSTU "VOENMECH", "Baltic state technical University "VOENMEH" named after. D. F. Ustinov", St. Petersburg, Russia (190005, Krasnoarmeyskaya str., 1), e-mail:maks.shvarts.92@mail.ru

<sup>3</sup>FSP "Nizhny Tagil Institute of metal testing", Nizhny Tagil (622015, Russia, Nizhny Tagil, St. Gagarina, 29) email address: litusigor2014@gmail.com

**Abstract:** This article is devoted to the development of a methodology for the consistent application of modern software and hardware to create virtual prototypes of fragments of irregular shape. Discusses the use of reverse engineering. The relevance of the developed method is in determination of the aerodynamic and the damaging effects of fragments of irregular shape in various projections and with large speed range, which is not always possible to obtain by experimental methods.

Key words: fragments of irregular shape; reverse engineering; ballistic properties.

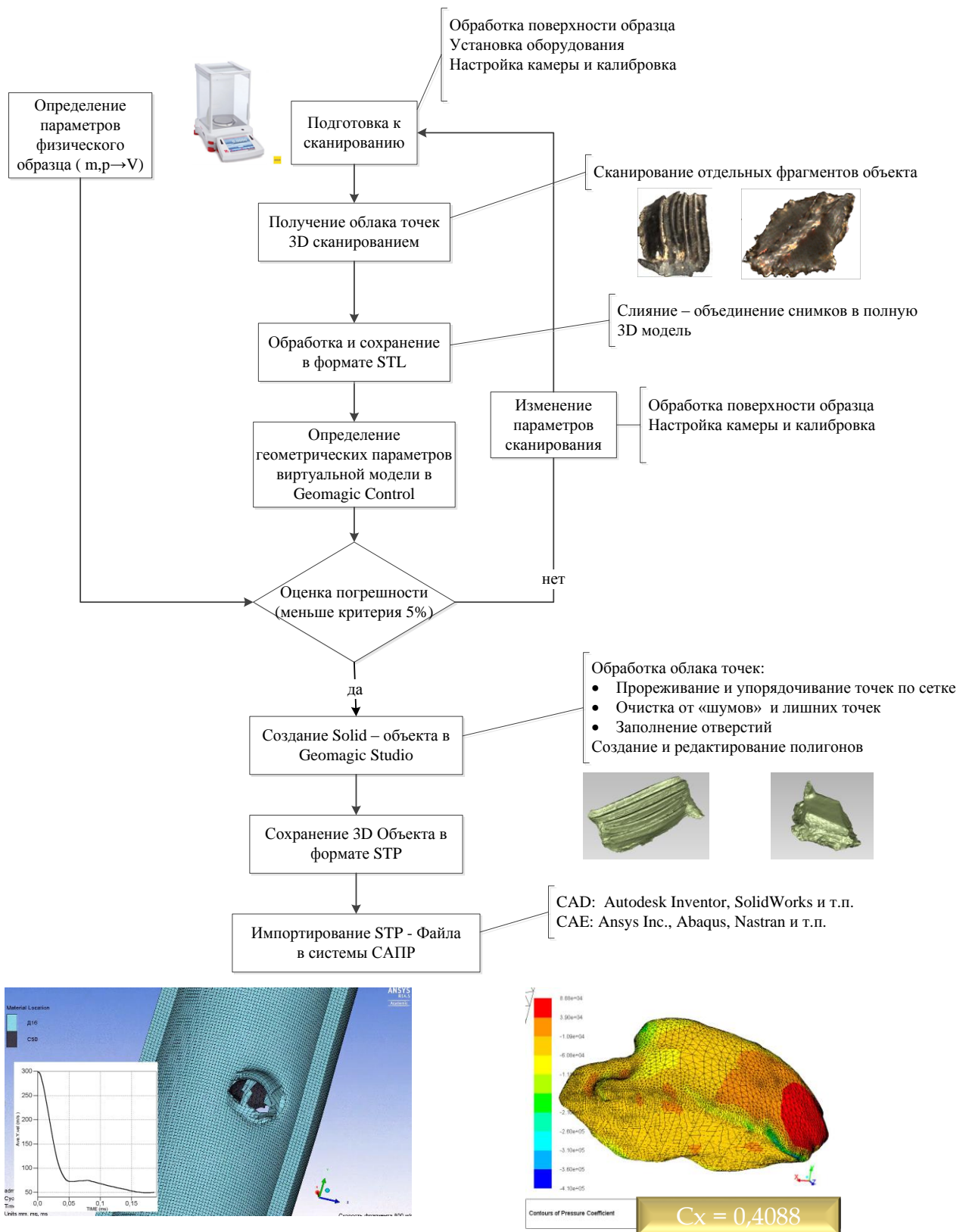
Целью данной работы является разработка методики последовательного применения современных программно-аппаратных комплексов с целью создания виртуальных прототипов фрагментов нерегулярной формы и дальнейшего определения их физических, аэродинамических и прочностных параметров с помощью численного моделирования.

Важной частью разрабатываемой методики является факт достоверности и точности данных, полученных об объектах исследования в результате построения виртуального прототипа в виде 3D – модели.

В связи с этим, в состав работы входят процессы применения следующих методик:

- гидростатического взвешивания, которая предназначена для определения эталонных физических свойств моделируемого объекта;
- создания облака точек с помощью сканирования структурированным светом, наиболее приближенного к реальному физическому объекту по критерию объема тела (форматы файлов STL, OBJ);
- создания 3D – модели (SOLID), которая заключается в преобразовании облака точек в полигональную модель, создания поверхностей и дальнейшую передачу данных в (форматы файлов STP, IGS и т.п.) CAD-систему;
- создания виртуального пространства, состоящего из элементов конструкций и набора фрагментов нерегулярной формы, с передачей данных в (форматы файлов STP, IGS и т.п.) CAE-систему;
- расчета аэродинамических свойств фрагментов нерегулярной формы в модулях CFD анализа CAE – системы;
- расчета прочностных и поражающих характеристик фрагментов нерегулярной формы в модулях явной динамики CAE – систем.

На рисунке 1 представлен алгоритм разрабатываемой методики применения численного моделирования для определения баллистических свойств осколков и их поражающего действия.



**Рисунок 1 – Алгоритм разрабатываемой методики применения численного моделирования для определения баллистических свойств осколков и их поражающего действия**

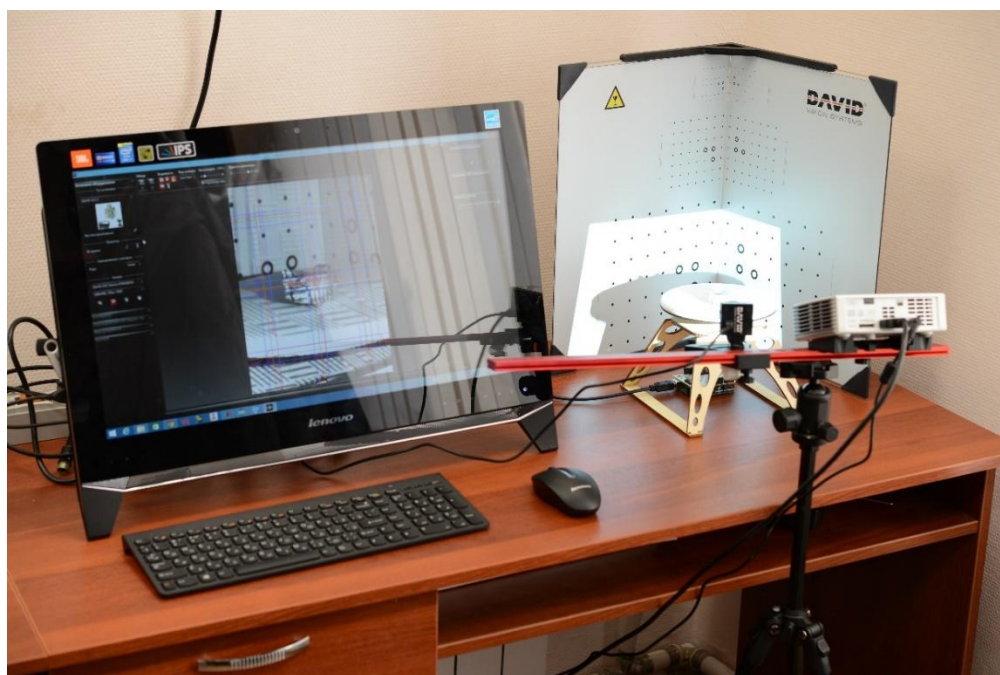
Объекты, имеющие нерегулярные формы поверхности, сложно, а порой и невозможно спроектировать в САД – системах. Поэтому, для проведения исследований с целью изучения их свойств и анализа функционирования, необходимо использовать метод обратного инжиниринга.

Целью обратного инжиниринга является получение математической модели в виде виртуального прототипа, созданного на основе измерения реального образца.

Метод применяется в военной промышленности, в автомобильной промышленности и в области высоких технологий – производстве программных систем и аппаратных средств продуктов, а также практически во всех областях производства товаров и услуг.

Для создания виртуального прототипа требуется специальное оборудование, которое представляет собой модельную установку оборудования DAVID SLS-2 для 3D-сканирования. 3D-сканирование – это систематический процесс определения координат точек, принадлежащих поверхностям сложнопрофильных физических объектов с целью последующего получения их пространственных математических моделей, которые могут модифицироваться с помощью CAD-систем [1]. С помощью 3D сканера процесс создания 3D-моделей не только упрощается, но и создается с максимальной точностью по отношению к исходному оригиналу.

Различают несколько методов сканирования. Наиболее приемлемым в области исследования фрагментов нерегулярной формы считается бесконтактное 3D-моделирование, представленное на рисунке 2. В основе современных технологий пространственного бесконтактного 3D-сканирования лежат физические эффекты отражения волн различной природы от поверхности и оптические эффекты преломления проецируемых образов.



**Рисунок 2 – Система для 3D-сканирования**

Поэтому перед сканированием необходимо произвести подготовку сканера и физического образца. Подготовка 3D-сканера включает в себя методы, которые требуются для вычисления позиции сканера относительно сканируемой сцены и применимы для различных типов объектов. Подготовка осколка заключается в очистке поверхности от загрязнения, а также при необходимости нанесения матирующего спрея, чтобы исключить преломление света, которое будет давать искажения в модели.

3D-сканирование происходит путем сканирования поверхности объекта и создания облака точек проекций фрагмента. Для уменьшения погрешности убирается лишняя геометрия. Из полученных фрагментов создается 3D-модель и сохраняется в формате STL. Данный формат файла используется для хранения трехмерных моделей объектов для использования в технологиях быстрого прототипирования.

Полученную 3D-модель в формате STL необходимо конвертировать в параметрическую модель. Для этого используется программное обеспечение Geomagic Studio, в котором находятся инструменты для преобразования данных сканирования в высококачественные поверхностные, полигональные или CAD модели.

По итогам сканирования одной из главных задач становится определение погрешности между физическим образцом и виртуальной моделью. Для определения геометрических параметров физического объекта воспользуемся методом гидростатического взвешивания [5]. Для определения плотности тела необходимо измерить его массу и объем:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Указанный метод используют для точного нахождения плотности, и дает возможность определить объем тела, не прибегая к нахождению его размеров. Определение плотности с помощью весов выполняется на основе закона Архимеда. Плотность твердых веществ определяется с помощью жидкости, плотность  $\rho_0$  которой известна, в качестве вспомогательной жидкости используется дистиллированная вода. Образец взвешивают в воздухе (А), а затем во вспомогательной жидкости (В). Плотность  $\rho$  можно вычислить по двум взвешиваниям следующим образом:

$$\rho = \frac{A}{A-B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L, \quad (2)$$

$$V_1 = \alpha \frac{A-B}{\rho_0 - \rho_L}, \quad (3)$$

где:  $\rho$  – плотность образца, г/см<sup>3</sup>;

$V_1$  – объем образца, см<sup>3</sup>;

**A** – взвешивание образца в воздухе;

**B** – взвешивание образца во вспомогательной жидкости;

$\rho_0$  – плотность вспомогательной жидкости, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_L$  – плотность воздуха (0,0012 г/см<sup>3</sup>);

$\alpha$  – поправочный коэффициент (0,99985) для учета веса вытесненного воздуха.

Использование методики обосновывается тем, данные о свойствах осколков, полученные в результате измерений, являются наиболее точными вследствие применения действительных физических законов. Это означает, что такие данные можно считать реальным, всевозможные погрешности минимизированы.

Для определения геометрических параметров виртуальной модели используется программное обеспечение Geomagic Studio, Geomagic Verify Viewer, которое позволяет автоматически вывести необходимые параметры объекта.

После определения геометрических параметров физического образца и виртуальной модели необходимо рассчитать погрешность их соотношений. В таблице 1 приведены результаты трех независимых опытов с разными осколками, где:  $V_1$  – объем физического образца,  $V_2$  – объем виртуальной модели,  $\Delta V$  – абсолютная погрешность измерений,  $\delta$  – относительная погрешность измерений.

Таблица 1 - Оценка погрешности между физическим образцом и виртуальной моделью

№ осколка	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$V_1$ , см <sup>3</sup>	$V_2$ , см <sup>3</sup>	$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	$\delta$ , %
1	7,694	0,8436	0,8485	0,0049	0,58%
2	7,833	0,7021	0,7020	0,0001	0,01%
3	7,673	1,8276	1,8001	0,0275	1,50%

Абсолютная ( $\Delta V$ ) и относительная погрешность ( $\delta$ ) измерений вычисляются по следующим формулам:

$$\Delta V = |V_1 - V_2|, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{\Delta V}{V_1} * 100\%. \quad (5)$$

На следующем этапе конвертируется облако точек в полигональную сетку. Полученная модель содержит дефекты: лишние точки, «шумы», отверстия, появившиеся в результате некачественного сканирования. Для того чтобы избавиться от дефектов используют инструменты Geomagic Studio. Затем выполняется оптимизация модели, изменения количества полигонов и их распределения.

После чего создается параметрическая модель, обладающая свойствами твердотельного объекта. Полученный файл с моделью сохраняется в формате STP (STEP) для дальнейшего импортирования в CAD системы. STP – стандарт ISO для компьютерного представления и обмена промышленными данными. Такой файл может быть загружен в любую систему автоматизированного проектирования для проведения дальнейшего исследования.

Выводы:

1. Применение данной методики, в отличие от эмпирических формул и приближенных расчетов характеристик в сравнении с объектами регулярной формы (сфера, цилиндр, пластинка и ромб), позволяет определить аэродинамические и поражающие действия фрагментов нерегулярной формы в различных проекциях и с большим диапазоном скоростей, что не всегда удается получить экспериментальными методами.
2. Современный инженер для достижения поставленной цели должен обладать знаниями не только в математике и физике, но и в применении различных современных программно-аппаратных комплексов для решения конкретных задач.

### Список литературы

1. CADmaster. Geomagic Studio [Электронный ресурс]: научн. журн. Режим доступа:
2. <http://www.cadmater.ru/>.

3. DAVID [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.david-3d.com/products/sls-2>.
4. Mettler-Toledo AG. Принцип определения плотности [Электронный ресурс] Руководство по эксплуатации. - Режим доступа:
5. [http://ru.mt.com/ru/ru/home/supportive\\_content/product\\_documentation/operating\\_instructions/NC\\_density\\_OI/jcr:content/download/file/file.res/Operating\\_Instructions\\_Density%20Kit\\_%28OP-RU%29.pdf](http://ru.mt.com/ru/ru/home/supportive_content/product_documentation/operating_instructions/NC_density_OI/jcr:content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_%28OP-RU%29.pdf).
6. Википедия. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/>.
7. Точное взвешивание. Определение плотности твердых тел и жидкостей [Электронный ресурс] Работа 1.4. - Режим доступа: [http://phys.bspu.by/static/um/phys/meh/1razd/new1\\_4.pdf](http://phys.bspu.by/static/um/phys/meh/1razd/new1_4.pdf).

### **The References**

1. CADmaster. Geomagic Studio [Electronic resource]: science magazine. Access mode:
2. <http://www.cadmaster.ru/>.
3. DAVID [Electronic resource] - Access mode: <http://www.david-3d.com/products/sls-2>.
4. Mettler-Toledo AG. The principle of determining the density [Electronic resource] Operation Manual - Access mode:
5. [http://ru.mt.com/ru/ru/home/supportive\\_content/product\\_documentation/operating\\_instructions/NC\\_density\\_OI/jcr:content/download/file/file.res/Operating\\_Instructions\\_Density%20Kit\\_%28OP-RU%29.pdf](http://ru.mt.com/ru/ru/home/supportive_content/product_documentation/operating_instructions/NC_density_OI/jcr:content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_%28OP-RU%29.pdf).
6. Wikipedia. [Electronic resource] - Access mode: <https://ru.wikipedia.org/>.
7. Accurate weighing. Determination of density of solids and liquids [Electronic resource] Work 1.4. - Access mode: [http://phys.bspu.by/static/um/phys/meh/1razd/new1\\_4.pdf](http://phys.bspu.by/static/um/phys/meh/1razd/new1_4.pdf).