

УДК 622.235.5

*к.т.н. Шульгин П. Н.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА

*Рассмотрены методы моделирования взрывных процессов, обосновано применение метода электрогидродинамических аналогий для моделирования взрыва, приведен программный комплекс, позволяющий упростить решение задач моделирования методом конечных элементов.*

**Ключевые слова:** взрыв, моделирование, аналогии, численные методы, геометрические модели, эквипотенциальные линии.

Большую роль при добыче полезных ископаемых играют взрывные работы. Однако до сих пор расчет параметров взрывных работ производится по эмпирическим формулам, полученным на основе обобщения практического опыта. Непрерывное увеличение масштабов взрывных работ и возникающие новые задачи взрывной отбойки (получение определенной кусковатости отбиваемой горной массы, выброс в требуемом направлении, расчет сложных схем расположения зарядов) требуют более глубокого изучения процесса действия взрыва в твердой среде и создания единой теории разрушения горных пород взрывом.

Решать обычными математическими методами практические задачи взрывного дела с учетом всех факторов, сопровождающих явления взрыва, нецелесообразно, поскольку это приводит к чрезвычайно сложным математическим выражениям, непригодным для практического использования. Опыт показывает, что на практике чаще всего приходится сталкиваться с вопросами влияния формы, размеров, взаимного расположения зарядов и свободных поверхностей на результат действия взрыва. Теория прежде всего должна указать метод решения задач, связанных с определением приведенных геометрических факторов.

Точный расчет действия взрыва на твердую среду – исключительно сложная задача. Поэтому для решения практических вопросов взрывного дела следует использо-

вать подходящую упрощенную модель, которая позволяет использовать основные факторы, определяющие рассматриваемые процессы, и дает возможность находить интересующий результат путем применения законов классической механики [1].

Конечный результат дробления породы зависит от свойств применяемых взрывчатых веществ, скорости их детонации, механической прочности породы, а также от других не менее важных факторов.

При решении задачи моделирования взрыва необходимо соблюдать все условия подобия между реальными процессами и процессами, протекающими в лабораторной модели.

При взрыве происходит крайне быстрое химическое превращение взрывчатого вещества с выделением тепла и образованием нагретых сжатых газов, которые, расширяясь, производят механическую работу. Следовательно, основной характеристикой взрыва должно быть общее количество выделившейся энергии  $Q$ .

Современными точными методами измерения можно весьма детально изучить процесс передачи энергии от взрывных газов окружающей среде. Фактически такая передача происходит благодаря образованию в массиве ударной волны, которая распространяется в твердой среде с очень большой скоростью, вследствие последовательного сжатия встречающихся на ее пути слоев породы. Если при этом деформация среды не выходит за пределы

упругости, то скорость  $W$  распространения такой волны выражается формулой:

$$W = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль упругости среды;  
 $\rho$  — плотность среды.

Газы совершают механическую работу, равную выделившейся при этом взрыве энергии  $Q$ . Если бы эта работа совершалась в течение конечного промежутка времени, то газы за это время увеличили бы свой объем на некоторую величину  $\Delta V$ . По этим значениям можно вычислить среднее расчетное давление газов:

$$\rho = \frac{Q}{\Delta V}. \quad (2)$$

Но вследствие мгновенности передачи энергии величину  $\Delta V$  следует считать бесконечно малой. В таком случае расчетное давление газов должно быть принято бесконечно большим. Механическое действие кратковременных сил выражается произведением их значений на время действия, т. е. удельным импульсом:

$$s = \rho \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Исследование процесса передачи энергии взрыва окружающей среде сводится к определению состояния идеальной несжимаемой жидкости, когда в ней в момент взрыва действует удельный импульс  $s$ , величина которого в разных точках жидкости будет разной и является некоторой функцией координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  рассматриваемой точки среды.

На основании второго закона Ньютона действие импульса вызывает образование количества движения, равного произведению массы части среды на вектор скорости, определяемого компонентами  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , которые равны соответственно:

$$u = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{s}{\rho} \right); v = -\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{s}{\rho} \right); w = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{s}{\rho} \right). \quad (4)$$

Поле образующихся скоростей имеет свой потенциал  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{s}{\rho}. \quad (5)$$

Составляющие вектора скоростей находят из выражений:

$$u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}; v = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}; w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (6)$$

На бесконечно большом расстоянии от центра взрыва действие его должно быть бесконечно малым. Следовательно,  $s = 0$  и  $\varphi = 0$ .

Полагают, что на поверхности раздела заряда и среды удельный импульс и потенциал скорости постоянны по всей поверхности заряда, т. е.  $\varphi = const$ .

В расчетной модели среда рассматривается как несжимаемая жидкость, для которой условие неразрывности движения среды имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

После подстановки в уравнение (7) компонентов скорости (6) получено:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0. \quad (8)$$

Таким образом, потенциал скорости удовлетворяет уравнению Лапласа, что позволяет использовать для его решения различного вида электрические модели.

При этом поле скоростей должно удовлетворять еще одному условию: полная кинетическая энергия среды должна быть равна энергии взрыва  $Q$ .

Приняв допущение, что среда является однородной, а ее поведение после взрыва достаточно удовлетворительно характеризуется уравнениями гидродинамики [2], получим простую модель действия взрыва, которую можно смоделировать методом электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), основанном на аналогии между

стационарным движением электрического тока в проводящей среде и процессами, протекающими при разрушении пород взрывом, заключающейся в том, что оба эти явления описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями [3].

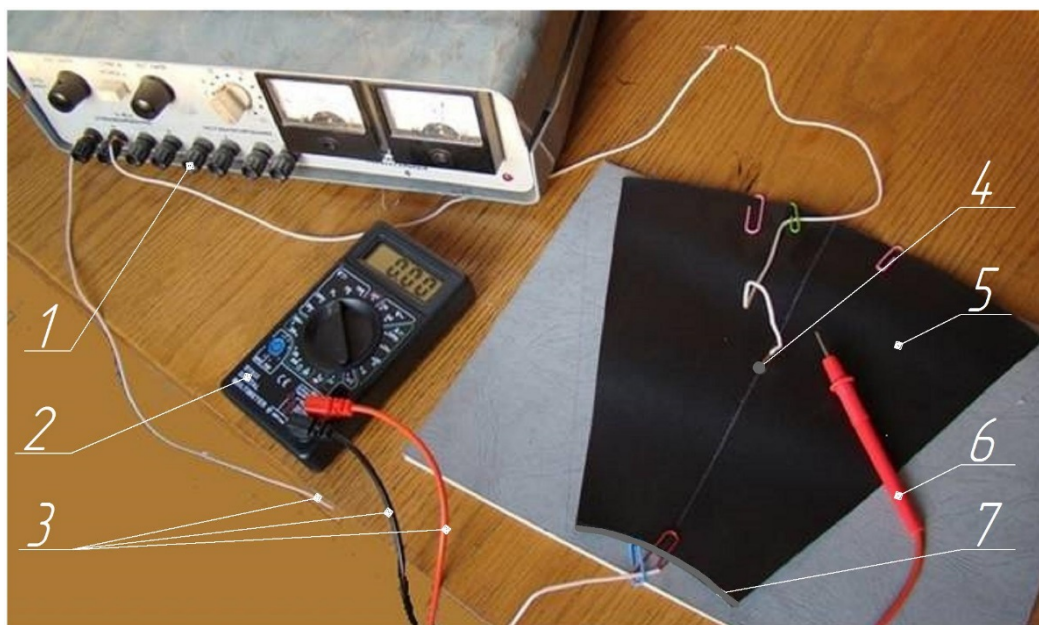
Метод ЭГДА был предложен академиком Н. Н. Павловским в 1922 г. [4] для решения гидротехнических задач и в настоящее время широко используется при исследованиях в различных областях физики, механики, гидротехники и др.

Метод ЭГДА как способ решения дифференциальных уравнений получил большое распространение вследствие простоты осуществления, наглядности и достаточной точности получаемых результатов. Это один из наиболее распространенных методов электрического моделирования.

Для осуществления метода ЭГДА применяют различные электропроводные материалы: станиоль, электролиты жидкие и желеобразные (на агар-агаре), смесь мраморной крошки с графитом, электропроводные лаки и краски, электропроводный картон и бума-

гу и др. Наиболее распространенными материалами в настоящее время являются электролиты и электропроводная бумага (ЭПБ).

Сущность метода ЭГДА с применением ЭПБ заключается в аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и распределением взрывных волн. В качестве электропроводящей среды применялась электропроводная бумага [1, 2]. Идея опыта заключалась в изготовлении конкретной модели заданного масштаба (имитирующей массив горной породы) с нанесенными на нее токопроводящими линиями, имитирующими заряд ВВ и открытую поверхность (рис. 1). Методика проведения экспериментов сводилась к определению местоположения точек с одинаковыми значениями приведенного электрического потенциала путем измерения напряжения на поверхности модели. Соединяя указанные точки плавными кривыми, получали эквипотенциальные линии, которые являются аналогами соответствующих параметров в натуре.



1 — блок питания; 2 — цифровой вольтметр; 3 — соединительные провода; 4 — заряд ВВ; 5 — лист электропроводной бумаги; 6 — щуп; 7 — электропроводная шина

Рисунок 1 Установка ЭГДА

Для установления взаимосвязи между полем скоростей и процессами разрушения модель абсолютно несжимаемой среды не пригодна, поэтому мы будем рассматривать среду, которая в процессе взрывного нагружения изменяет свои свойства. Такой подход к выбору модели среды вполне закономерен. Принятые допущения позволяют построить простую модель действия взрыва, при котором поведение среды после него характеризуется уравнениями гидродинамики, в частности, потенциал начальной скорости описывается уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0; \Delta \varphi = 0. \quad (9)$$

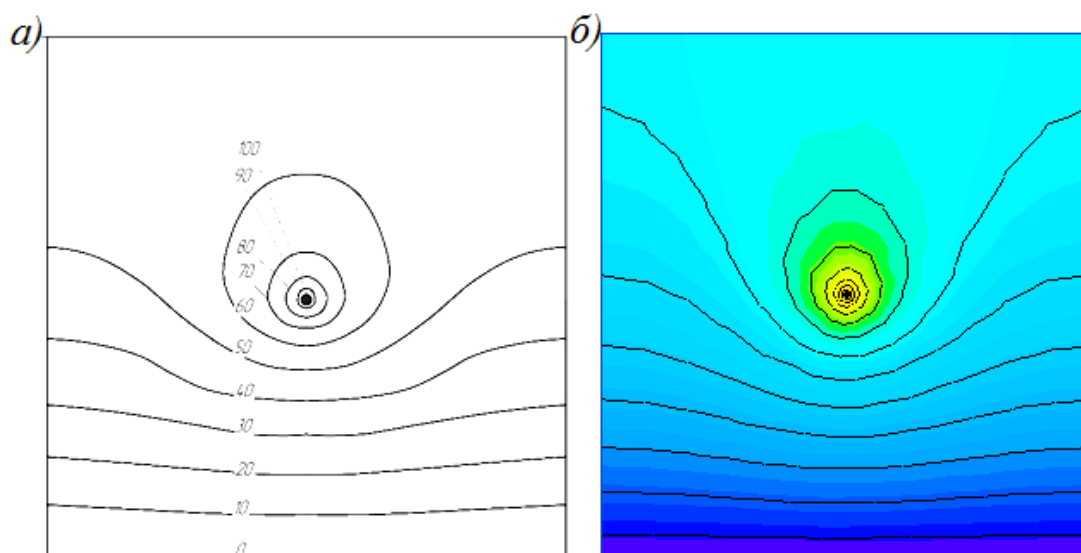
По величине потенциала скорости можно найти в каждой точке среды величину вектора скорости, определяющего на единицу массы начальный запас кинетической энергии, полученный средой под действием взрыва. Таким образом, математически нахождение начального поля скоростей сводится к решению дифференциального уравнения в частных производных второго порядка, однако аналитическое решение уравнения Лапласа сложно и трудоемко.

Метод ЭГДА дает возможность заменить определение потенциала скорости путем аналитического решения уравнения Лапласа непосредственным измерением электрического потенциала на модели.

Однако приведенный метод, несмотря на свои достоинства, также обладает рядом недостатков, среди которых: трудоемкость изготовления модели, длительность снятия показаний и обработки опытных данных.

Для упрощения проведения моделирования был использован многофункциональный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов ELCUT<sup>®</sup> 6.3 [5], лишенный перечисленных недостатков.

Автоматическая система программы позволяет создать геометрическую модель, просмотреть результаты поведения модели в заданных условиях, а также получить результаты расчета в различных формах представления: линии поля, цветные карты (рис. 2), графики различных величин вдоль произвольных контуров и пр. Без больших усилий позволяет вычислять различные интегральные величины на заданных линиях, поверхностях или объемах.



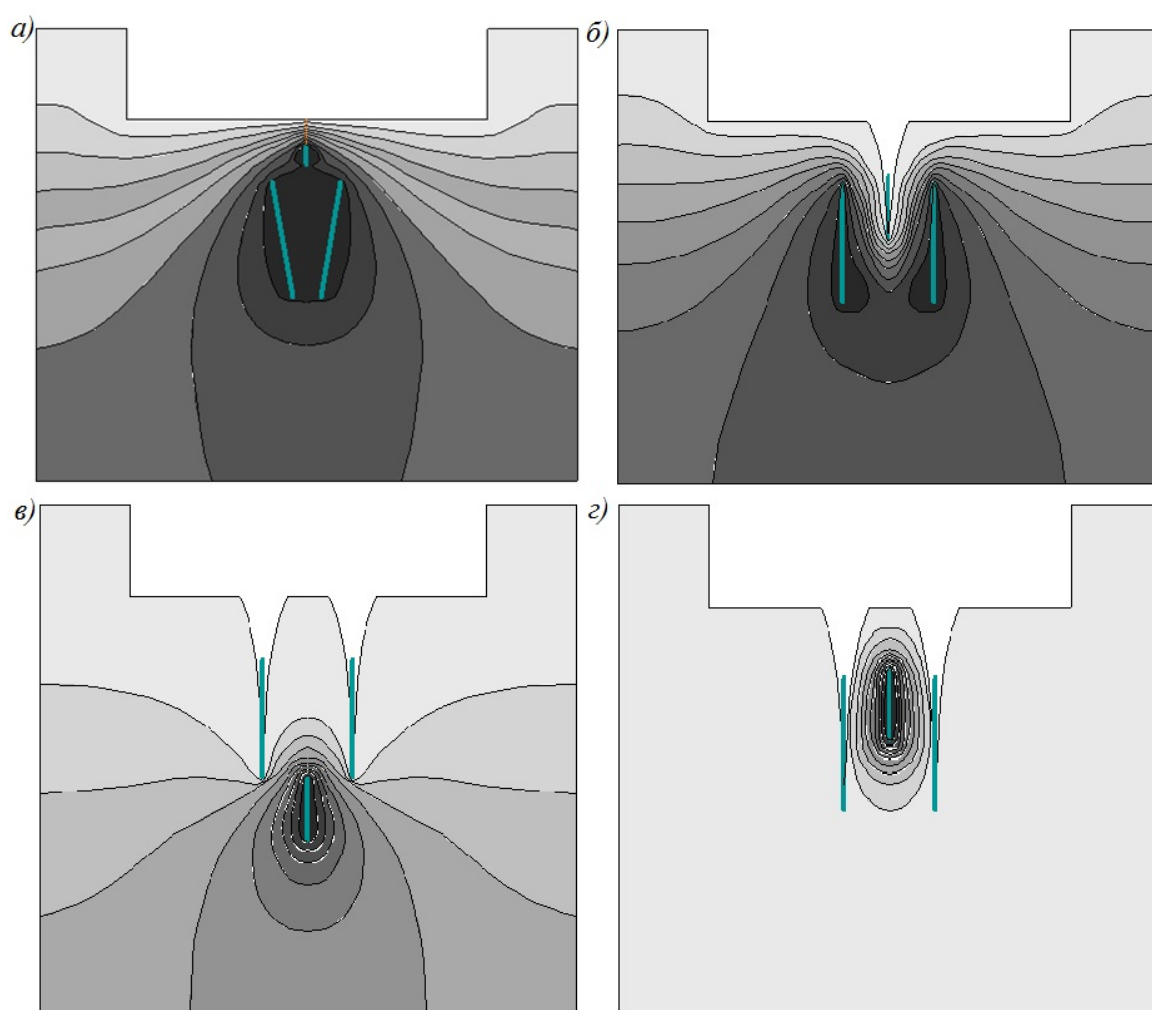
а) распределение напряжений, полученное при помощи моделирования на электропроводной бумаге; б) данные полученные при использовании программного комплекса ELCUT<sup>®</sup> 6.3

Рисунок 2 Построение эквипотенциальных линий на прямолинейном контуре

Применение программного комплекса ELCUT<sup>®</sup> 6.3 позволяет получать распределение энергии при взрыве, учитывая любые геометрические параметры модели, различное количество одновременно взрывающихся зарядов и другие параметры.

Исследуемая модель представляла собой взрыв цилиндрических зарядов по оси заряда. Для моделирования действия взрыва были проанализированы наиболее распространенные типы врубов (конический и призматический). В первой серии экспериментов моделировали конический

вруб, а затем различные варианты призматического вруба: с детонацией короткого центрального заряда в первую очередь и детонацией зарядов по окружности во вторую очередь; с детонацией зарядов по окружности в первую очередь и детонацией центрального удлиненного заряда во вторую очередь; с детонацией зарядов по окружности в первую очередь и детонацией центрального короткого заряда во вторую очередь. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.



*а) при коническом врубе; б) при детонации короткого центрального заряда в первую очередь и детонации зарядов по окружности во вторую очередь; в) при детонации зарядов по окружности в первую очередь и детонации центрального удлиненного заряда во вторую очередь; з) при детонации зарядов по окружности в первую очередь и детонации центрального короткого заряда во вторую очередь*

Рисунок 3 Распределение напряжений, полученных при моделировании

Проведенные исследования показали, что:

– при проведении моделирования необходимо использовать упрощенную модель действия взрыва в массиве горных пород, которая дает возможность получить результат и учесть основные влияющие факторы;

– в качестве одного из способов решения дифференциальных уравнений можно применять метод ЭГДА, основанный

на аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и процессами, протекающими при разрушении пород взрывом;

– применение программных комплексов для моделирования полей методом конечных элементов (типа ELCUT® 6.3) позволяет получить достоверные результаты с меньшими затратами по сравнению с методами непосредственного физического моделирования.

### Библиографический список

1. Насонов, И. Д. Моделирование физических процессов в горном деле [Текст] / И. Д. Насонов, В. И. Ресин. — М. : Изд-во Академии горных наук, 1999. — 343 с.
2. Власов, О. Е. Основы расчета дробления горных пород взрывом [Текст] / О. Е. Власов, С. А. Смирнов. — М. : Изд-во АН СССР, 1962. — 104 с.
3. Тетельбаум, И. М. Электрическое моделирование [Текст] / И. М. Тетельбаум. — М. : Физматиздат, 1959. — 320 с.
4. Павловский, Н. Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения (1922 г.) : собр. соч. 2-х т. Т. 2 [Текст] / Н. Н. Павловский. — М. : Изд-во АН СССР, 1956. — 352 с.
5. ELCUT® 6.3 Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов: руководство пользователя. — ООО «Тор», Санкт-Петербург, 2017 — 296 с.

© Шульгин П. Н.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г., д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГ ДонНТУ Борщевским С. В.*

Статья поступила в редакцию 29.11.17.

**к.т.н. Шульгин П. М.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

### ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДІЇ ВИБУХУ

*Розглянуто методи моделювання вибухових процесів, обґрунтовано застосування методу електрогідродинамічних аналогій для моделювання вибуху, наведено програмний комплекс, що дозволяє спростити рішення задач моделювання методом кінцевих елементів.*

**Ключові слова:** вибух, моделювання, аналогії, чисельні методи, геометричні моделі, еквіпотенціальні лінії.

**Ph.D. Shulgin P. N.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)

### USING NUMERICAL METHODS FOR SIMULATION THE EXPLOSIVE ACTION

*The methods of modeling explosive processes are considered, the application of the method of electrohydrodynamic analogies for modeling the explosion is justified, the software complex allowing to simplify the solution of modeling problems by the finite element method is given.*

**Key words:** explosion, modeling, analogies, numerical methods, geometric models, equipotential lines.