

УДК 622.2:519.67

И. В. Назаров, В. М. Брыксин, В. В. Савеленко

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УСРЕДНЕННЫХ СЕЧЕНИЙ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ КООРДИНАТ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕВАЛКИ ВСКРЫШИ ДРАГЛАЙНАМИ

127

Разработан прототип информационно-аналитической технологии, позволяющий моделировать перевалку пород драглайнами в трехмерном пространстве при помощи двумерных численных алгоритмов. С помощью методов аналитической геометрии и математической статистики был решен ряд задач по преобразованию исходных данных в сеточные модели, созданию усредненных сечений и локальных систем координат, моделированию трасс экскаваторов в локальных системах координат и обратному преобразованию результатов моделирования в исходную систему координат.

The authors have developed a prototype of that information and analytical technology for modeling dragline waste rehandling in three-dimensional space through two-dimensional numerical algorithms. Using the methods of analytical geometry and mathematical statistics, a number of problems of transforming basic data to net models, creating average sections and local systems of coordinates, modeling routes of excavators in local systems of coordinates, and return transformation of modeling results to the initial system of coordinates have been solved.

Ключевые слова: драглайн, сеточные модели поверхности, уравнения регрессии, аффинное преобразование.

Key words: dragline, grid models of surface, regression equation, affine transformation.

Цель исследований, представленных в данной статье, заключалась в разработке информационно-аналитической технологии, позволяющей вычислять (и рекомендовать лицу, принимающему решение) оптимальные параметры системы разработки при перевалке взорванных полускальных пород во внутренний отвал одноковшовыми экскаваторами – драглайнами (далее – бестранспортной вскрыши) в 3D-постановке.

В зарубежных горно-геологических пакетах задача моделирования бестранспортной вскрыши решается на 2.5-мерных моделях: в программе Runge DragSim (Австралия) технология моделируется на трех смежных сечениях (на первом – черпание, на втором – установка и площадка, на третьем – разгрузка), в программе Carlson Software (США) и аналогах все операции моделируются на одном сечении.



В дальнейшем применяются алгоритмы пространственной триангуляции для создания результирующих технологических поверхностей. Параметры системы разработки, в том числе место установки драглайна, задаются «вручную» (в программе Mincom DragSim (Австралия) — с помощью встроенного конструктора формул). В смежных областях горного дела существует успешный опыт применения 3D- или 4D-моделей для моделирования залежей, управления и оптимизации [1–3].

В 2001–2003 гг. на основе использования численных методов математического моделирования создан (в 2011–2013 гг. — модифицирован) программный комплекс Minescal_Opt [4], предназначенный для автоматизированного проектирования перевалки взорванных вскрышных пород в 2D-постановке. Комплекс основан на:

- методе градиентного спуска для определения оптимального положения драглайна в забое, породу которого возможно перевалить за один ход [5];

- методике перебора с ветвлением для определения оптимального положения забоев на смежных ходах при выемке забоя за несколько ходов без переэкскавации существующего отвала;

- методике перебора с ветвлением для определения оптимального положения забоев на смежных ходах при переэкскавации пород существующего отвала [6];

- решении обратной задачи численного моделирования при определении оптимального положения забоев по критерию минимума разности скорости продвижения экскаваторов на смежных ходах;

- реализации адаптивного подхода к формированию вычислительных алгоритмов, ориентированного на использование управляющих сетевых структур, состав и взаимоотношения элементов которых не постоянны, а формируются в результате решения оптимизационных задач или управляющего воздействия лица, принимающего решение [7].

Основная идея исследований заключалась в следующем: оставаясь в рамках существующей парадигмы моделирования перевалки пород драглайнами как технологических схем (range and balance diagram) на поперечных сечениях, обеспечить преобразование трехмерных поверхностей для 2-моделирования (предпроцессинг) и преобразование полученных результатов 2D-моделирования в трехмерное представление (постпроцессинг).

Для стадии предпроцессинга были реализованы следующие математические модели и алгоритмы.

Поиск положения осей технологической системы координат. Построение уравнения линейной регрессии для базовой линии (положение дна карьера — пересечение положения поверхности почвы нижнего пласта с поверхностью откоса борта карьера) в качестве X-оси технологической системы координат. В некоторых вычислительных экспериментах базовая линия была скрыта под слоем пород. Поэтому ее положение вычислялось аналитическим способом — посредством выбора (в графической среде) хорошо прослеживаемой технологической линии (например, кровли пласта или бровки бестранспортного уступа) и задания среднего отклонения базовой линии от выбранной технологи-



ческой линии по осям YZ . Далее — вычисление минимальной точки базовой линии в качестве нулевого положения Z -оси технологической системы координат; определение положения Y -оси как уравнения перпендикуляра к XZ плоскости в точке начала участка моделирования. Отметим, что базовая линия может иметь существенные отклонения от оси X как по горизонтали, так и по вертикали.

Векторное преобразование (поворот со смещением) точек и линий исходного положения горных работ в технологическую систему координат осуществляется с использованием стандартного аффинного преобразования. На первом этапе строится уравнение регрессии в системе координат XU , где в качестве измеренных точек выступают узлы базовой ломаной линии. Центром координат выступает проекция узла базовой линии с минимальной высотой на построенную линию регрессии. Аффинное преобразование осуществляется таким образом, чтобы отвал был в положительных координатах по U , поэтому при необходимости выполняется зеркалирование.

Следующий этап — построение сеточной модели (шаг сетки — 1 м) поверхности отвала с учетом разрывных линий. Ввиду ярко выраженного техногенного характера поверхности было принято решение отказаться от стандартных методов интерполяции и использовать двухстадийный алгоритм преобразования. На первом этапе строится модель поверхности — нерегулярная триангуляционная сеть (TIN) с учетом характерных разрывных технологических линий. На втором — TIN-модель преобразуется в сеточную модель посредством двумерной линейной интерполяции. Линейная интерполяция рассматривает треугольники TIN как плоскости. Каждой выходной ячейке присваивается высота точки пересечения плоскости того треугольника, который попадает на центр ячейки в 2D-пространстве, с перпендикуляром из центра ячейки.

На полученной GRID-модели строятся YZ -сечения (свертки) по оси X с вычислением математического ожидания положения Z -координаты для заданных областей (полос) по X -рядам сетки.

Полученные свертки могут иметь разные типы — глобальный (для всего участка) и локальный (для выделенных полос). Особенность примененного метода состоит в том, что для каждой локальной области производится поправка (сдвиг) полученных координат по осям U и Z в зависимости от величины и направления отклонения среднего положения базовой линии в пределах локальной области от оси X . Таким образом, для каждой локальной области (полосы) осуществляется два преобразования координат — из исходной в технологическую (поворот со смещением) и из технологической в локальные (сдвиг по U и Z).

На стадии 2D-моделирования осуществлена следующая итерационная информационная технология:

Для глобального YZ -сечения производится автоматизированный поиск оптимальной технологии (ряда технологий) перевалки вскрыши с помощью программы `Minercalc_Opt`. Фиксируется количество экскаваторных ходов и порядок взаимосвязей между ходами (способ ведения работ) — рисунок 1.

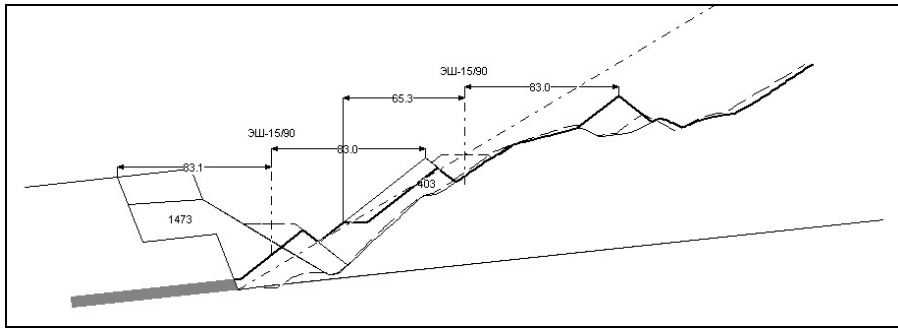


Рис. 1. Фиксированная схема, полученная на глобальном сечении

Для каждого из локальных YZ -сечений находится оптимальное положение экскаватора для фиксированной (на этапе моделирования на глобальном YZ -сечении) технологии.

Производится сглаживание вычисленных трасс экскаваторов посредством построения уравнений регрессий (до 3-го порядка) в плоскостях XZ (вид сбоку: слева вверх – первый ход, слева вниз – второй ход) и XY (вид сверху: слева вверх – первый ход, слева вниз – второй ход) для технологической системы координат. Выбираются уравнения регрессии с лучшим коэффициентом корреляции. Вычисляется положение точек на уравнениях регрессии, соответствующих положению YZ -сечений (на рис. 2 – ромбы).

Далее проверяется возможность размещения экскаватора на сглаженных локальных координатах с помощью модернизированной программы *Minacalc_Opt*, имеющей опцию поиска оптимального положения экскаватора для фиксированного уровня (Z -координаты). Данная проверка необходима из-за того, что вычисленное на предыдущем шаге оптимальное положение экскаватора чаще всего близко к экстремальному положению (минимум, максимум по технологическим или пространственным возможностям). Отклонение за экстремум может привести к нарушению условий безопасной работы экскаватора. Поэтому при нарушении экстремумов осуществляется пошаговый (по оси Y , затем по оси Z) поиск возможного положения экскаватора в окрестности сглаженных координат (на рис. 2 – квадраты и новая линия регрессии – толстая линия на графиках). Для проверенных (найденных с отклонением) координат экскаватора строятся результирующие положения отвала по YZ -сечениям.

Для стадии постпроцессинга реализованы следующие математические модели.

Интерполяция полученных результирующих положений отвала (в виде ломаных линий на локальных YZ -сечениях) в регулярную сетку с шагом 1 м по Y -оси и шагом YZ -полос по X -оси.

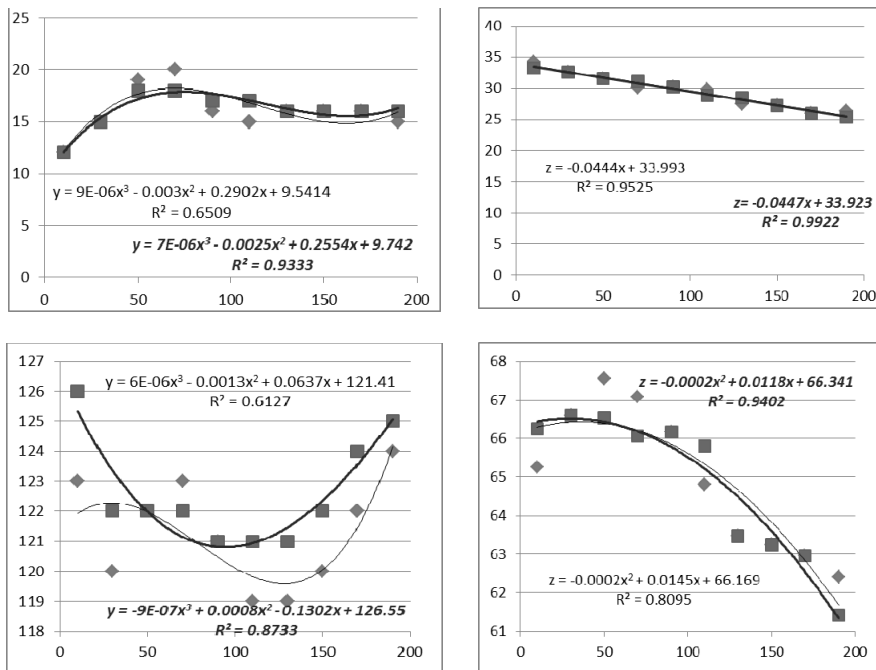


Рис. 2. Выравнивание кривизны трасс экскаватора

Обратное преобразование точек результирующего положения отвала и линий ходов экскаватора (рис. 3) из локальных систем координат в технологическую, и из технологической — в исходную. Построение триангуляционной модели (TIN) результирующего положения отвала показано на рисунке 4. Необходимость выбора триангуляционной модели обусловлена иррегулярностью облака точек в исходной системе координат из-за двойного преобразования систем координат для точек на YZ-сечениях.

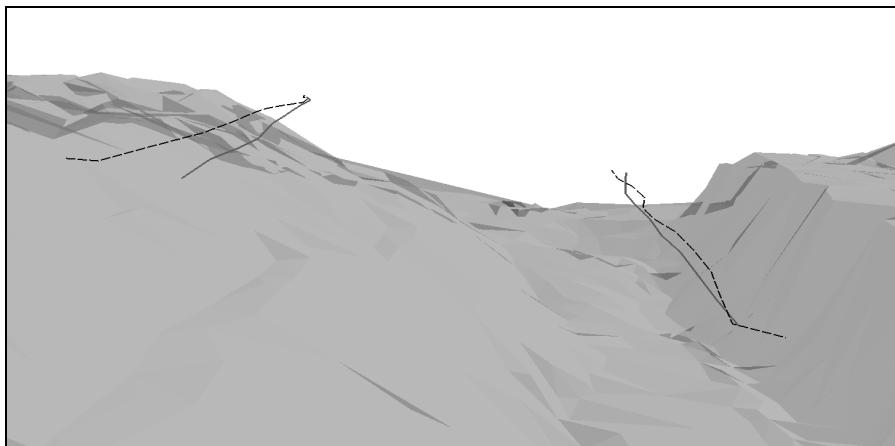


Рис. 3. Положение вычисленных (пунктир) и выровненных трасс экскаваторов

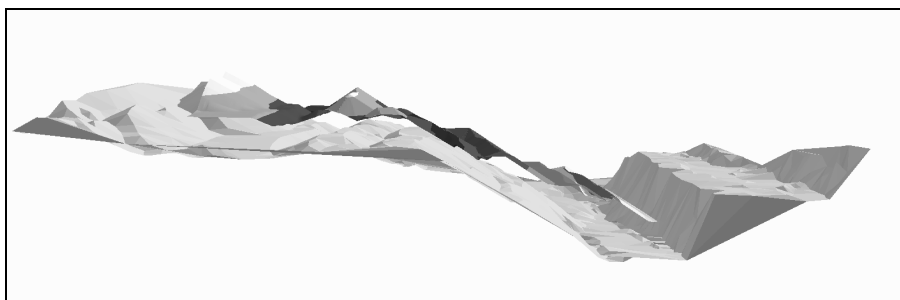


Рис. 4. Положение результирующей модели отвала на фоне исходной

В 2015 г. планируются продолжение вычислительных экспериментов для совершенствования разработанной на этапе 2014 г. гибридной информационной технологии и разработка классификации факторов нарушения условий моделирования (отказов) с целью выработки системы рекомендаций для предварительной оценки и изменения исходных данных и постановок задач.

Кроме того, для обоснования новой методологии моделирования отвалов драглайна в 3D-пространстве на криволинейных сетках авторы намерены проверить:

- гипотезу профессора В.Г. Пронозы о целесообразности моделирования отвалов драглайна на дугообразных сетках, имитирующих поворот драглайна при разгрузке;
- гипотезу о возможности моделирования размещения отвалов драглайна на полиномиальных сетках, параллельных линиям трендов (гладких сплайнов) экскаваторных ходов.

Предполагается автоматизация процедур пред- и постпроцессинга в виде исполняемых подпрограмм в среде ArcGIS ArcScene.

В заключение отметим следующее.

В результате проведения вычислительных экспериментов доказана принципиальная возможность вычисления рационального положения экскаваторных ходов в 3D-постановке с использованием модифицированной программы *Minescalc_Opt*.

С целью обеспечения пред- и постпроцессинга с сохранением существующей парадигмы моделирования перевалки пород драглайнами на поперечных сечениях предлагается:

- для моделирования поверхности внутреннего отвала предложено использовать преобразованную в технологическую систему координат (соответствующую реальному положению фронта горных работ в пространстве) сеточную модель – в отличие от стандартных триангуляционных моделей;
- для создания 2D-моделей внутреннего отвала (сверток) обосновано применение метода усредненных сечений с локальным преобразованием координат по отдельным полосам сетки и вычислением математического ожидания высотной отметки по рядам сетки в полосах – в отличие от стандартной процедуры сечения 3D-поверхности вертикальной плоскостью;



— для выравнивания кривизны хода на основе вычисленных положений установки экскаватора для усредненных сечений в горизонтальной и вертикальной плоскостях предложен способ построения и контроля уравнений регрессии первой, второй или третьей степени.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 14-07-00182 «Новый подход к математическому моделированию технологий открытых горных работ».

Список литературы

1. Капутин Ю.Е. Информационные технологии планирования горных работ (для горных инженеров). СПб., 2004.
2. Фрейдина Е.В., Ботвинник А.А., Дворникова А.Н. Методологические основы и инструментарий для развития робастного управления горными работами на карьерах. Ч. 1: Система принятия решений в контексте управления качеством добываемого полезного ископаемого // ФТПРПИ. 2014. № 2. С. 110–125.
3. Темкин И.О., Кубрин С.С., Куляница А.Л., Виленкин Е.С. Использование интеллектуальных систем управления роботизированными очистными комплексами в сложных горно-геологических условиях // Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка-2015» (Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня). М., 2015. С. 294–303.
4. Назаров И.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа формирования многоходовой технологии перевалки взорванной вскрыши драглайнами Minecalc_Opt». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ № 2014611053 от 23.01.2014 г.
5. Назаров И.В. Численное моделирование технологии перевалки вскрышных пород драглайнами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 1. С. 53–60.
6. Назаров И.В. Применение численных методов для математического моделирования технологий работы драглайнов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 4. С. 257–268.
7. Назаров И.В. Применение управляющих структур для организации адаптивного вычислительного процесса моделирования перевалки вскрыши драглайнами // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. Вып. 10. С. 114–120.

Об авторах

Игорь Владимирович Назаров — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: INazarov@kantiana.ru

Виталий Михайлович Брыксин — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Василий Викторович Савеленко — науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VSavelenko@kantiana.ru

About the authors

Dr Igor Nazarov, PhD, Associate Professor, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad.

E-mail: INazarov@kantiana.ru



Dr Vitaliy Bryksin, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Vasiliy Savelenko, Research Fellow, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad.

E-mail: VSavelenko@kantiana.ru