



И. В. Назаров

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕВАЛКИ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ДРАГЛАЙНАМИ

Представлены постановки двух прямых задач численного моделирования для простых одноходовых и усложненных многоходовых бестранспортных систем и одна обратная задача численного моделирования (для усложненных двухходовых систем).

148

Statement of two direct problems of numerical modeling for the simple one-pass overburden rehandling systems and the complicated multiple-pass overburden rehandling systems and one return statement of problem of numerical modeling (for the complicated double-pass systems) are presented

Ключевые слова: численное моделирование, программное обеспечение, драглайн.

Key words: numerical modeling, software, dragline.

Системы разработки с поперечным перемещением вскрышных пород в выработанное пространство с помощью экскаваторов драглайнов (бестранспортные системы разработки по классификации Н.В. Мельникова [1]) — одни из наиболее энергосберегающих и экологически чистых технологий ведения открытых горных работ. Но так как условия ведения горных работ постоянно ухудшаются (в связи с углублением карьеров и выработкой «легких» запасов) [2], объемы бестранспортной вскрыши уменьшаются, что помимо прочего ведет к увеличению энергоемкости и себестоимости добычи угля. Кроме того, при этом растет экологическая нагрузка на ландшафты из-за необходимости отторжения земель под внешние отвалы. Сохранение объемов вскрышных пород, перемещаемых бестранспортным способом во внутренние отвалы, на более длительный срок возможно только за счет усложнения технологических решений, перехода к технологиям с многократной перевалкой пород (далее — многоходовым технологиям).

Проектирование подобных технологических систем — сложная инженерная задача, требующая значительных трудозатрат высококвалифицированного персонала. Но с другой стороны, в смежных областях наук о Земле существует успешный опыт решения не менее сложных задач с помощью численных методов математического моделирования, например, задачи определения положения нефтегазовых пластов при сейсмической разведке, прогнозирования гидродинамических процессов в пласте и скважинах при моделировании разработки месторождений углеводородов. В горной науке численные методы применяются для вычисления оптимальных контуров карьеров, календарного планирования, экономического анализа и т. д. [3–5]. Поэтому применение численных методов математического моделирования для создания современных информационно-вычислительных комплексов, позволяю-



щих автоматизировать проектирование многоходовых технологий, повысить точность прогноза, эффективность и экологическую безопасность вскрышных работ, является актуальной научной задачей в области рационального недропользования.

Цель исследований, представленных в данной статье, заключалась в создании информационно-аналитических программных комплексов, позволяющих вычислять (и рекомендовать лицу, принимающему решение) оптимальные параметры систем разработки при перевалке взорванных полускальных пород во внутренний отвал одноковшовыми экскаваторами драглайнами (далее – бестранспортных систем). Эти технологии характерны для ряда крупных угольных карьеров Западной и Восточной Сибири. Задача исследований была существенно осложнена тем, что традиционные методы моделирования бестранспортных систем разработки были ориентированы на иную предметную среду, а именно на перевалку рыхлых покрывающих пород месторождений с горизонтальным залеганием угольного пласта. Наиболее важным фактором является то, что при современных технологиях горных работ сечения поверхностей добычных и вскрышных уступов (далее – массива), развала взорванных горных пород (далее – развала) и существующего внутреннего отвала (далее – отвала) имеют сложное строение и описываются ломаными линиями. Эти ломаные линии, в свою очередь, нельзя аппроксимировать прямыми линиями без значимой потери точности и искажения положения характерных точек. Поэтому контуры забоя, предотвала (специально формируемой рабочей площадки) и отсыпаемого отвала на плоскости сечения невозможно представить в виде правильных геометрических фигур – треугольников, трапеций и т. д.

Главная идея состоит в том, что задачу определения положения элементов системы разработки (на плоскости поперечного сечения) в вышеизложенных условиях предлагается решать на основе сочетания:

– существующих аналитических функций и эмпирических зависимостей – отражающих многолетние практические знания и статистическую обработку результатов наблюдений и экспериментов (оставим за скобками то, что в настоящий момент они во многом устарели и нуждаются в переосмыслении);

– двумерной аналитической геометрии – векторные и аффинные преобразования, алгоритмы поиска точек пересечения прямых и ломаных, вычисления площади многоугольника, пересечения и объединения многоугольников и т. д.;

– и численных методов математического моделирования, в частности перебора и оптимизации.

При этом эмпирические зависимости и геометрические процедуры используются для определения значений переменных в ограничениях и целевых функциях. Совокупность ограничений и порядок вычисления переменных не являются постоянными, они существенно зависят от положения экскаватора относительно других элементов системы разработки (забоя, отвала, основания) и определяются заданным порядком ведения горных работ.



Рассмотрим три уровня решения задач численного моделирования:

А) прямая задача определения оптимального положения экскаватора в забое, выемка и укладка породы из которого возможна за один ход;

В) прямая задача для определения оптимального положения совокупности забоев, необходимых для выемки и укладки заданной вскрыши, если выемка и укладка ее за один ход невозможна;

С) обратная задача определения положения экскаваторов на смежных ходах при условии выравнивании скоростей подвигания забоев.

Отметим вложенность задач: задача А) входит в состав задачи В), а задача В) является основанием для решения задачи С).

Сформулируем задачу А) в следующей постановке:

1. Контур забоя считается заданным, он представляет собой не изменяемый в процессе вычислений замкнутый многоугольник и параметров экскаватора достаточно для его выемки. На области определения существуют точки, при установке драглайна в которых свободной отвальной емкости достаточно для полного размещения породы из заданного забоя. Если подобных точек нет, то необходим переход к задаче В).

2. Оптимальной является точка, при установке драглайна в которой скорость подвигания забоя v максимальна.

Эта задача двумерной оптимизации на плоскости $v = f(x, y) \rightarrow \max$. Границы области определения $G(x, y)$ зависят от величины конструктивных параметров драглайна (радиуса R_d , высоты H_d и глубины D_d черпания), а также от ширины W_c и высоты H_c забоя (рис.1). При шаге перебора s , количество точек множества G равно

$$G = (2R_d - W_c)(H_d + D_d - H_c) / s^2.$$

Для решения задачи В) применен метод градиентного спуска — с приближенным вычислением частных производных в опорных точках с помощью разностных отношений:

$$df/dx = (f(x \pm s, y) - f(x, y)) / s, \quad df/dy = (f(x, y - s) - f(x, y)) / s.$$

Опорной точкой считается точка с наибольшей скоростью подвигания на данном уровне спуска по оси Y . Если v в опорной точке на уровне $y-s$ меньше, чем на уровне y , то v_y считается оптимумом и спуск прекращается.

В задаче В) на первом этапе вычисляется начальное размещение забоев смежных ходов (рис. 2), где Sw — заданный контур забоя на первичном ходе; Sr — вычисленный контур забоя на вторичном ходе; W — максимально возможное (по радиусу и глубине черпания) положение экскаватора на первичном ходе; D_{max} — максимально возможный контур отвала первичного хода, размещаемый без освобождения дополнительной отвальной емкости; E_0 — контур дополнительной отвальной емкости, необходимой для размещения этого отвала. Его положение вычисляется посредством продолжения линии откоса отвала D_{max} до положения B_0 , при котором сумма площадей контуров D_{max} и E_0 равна требующейся площади отвала первичного хода. Точка B_0 — это нижняя бровка вторичного забоя S_r , обеспечивающего необходимую дополнительную емкость E_0 .

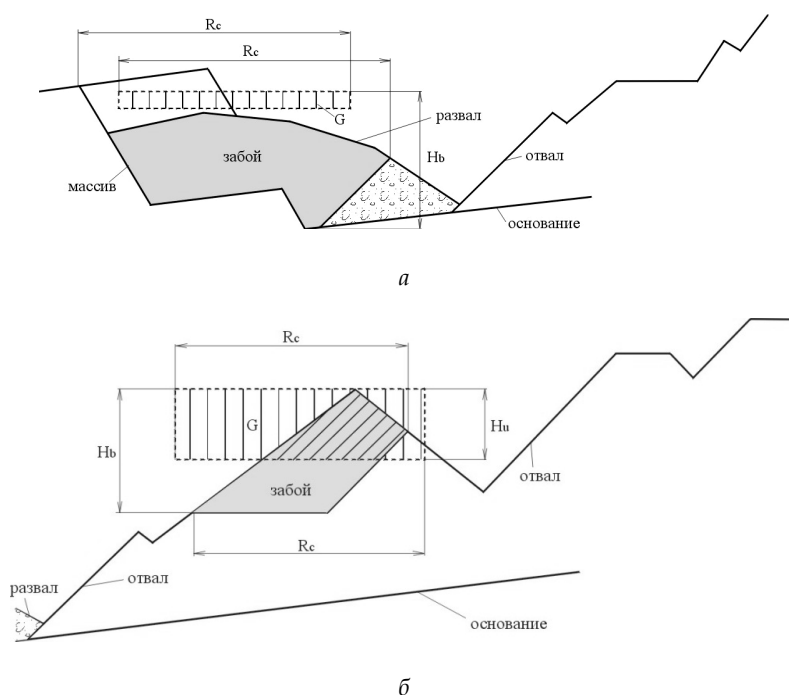


Рис. 1. Множество точек G, в которых может быть установлен драглайн:
 а – вскрышной забой (без верхнего черпания по полускальной вскрыше);
 б – забой по переэкскавации (с возможностью верхнего черпания)

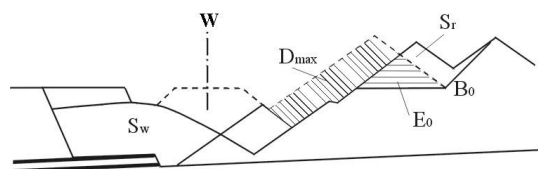


Рис. 2. Порядок определения положения забоя на вторичном ходе при максимально возможном положении экскаватора на первичном ходе

Оптимальное положение нижней бровки забоя вторичного хода V_i определяется условием обеспечения необходимой отвальной емкости по мере пошагового уменьшения Y – координаты нижней бровки забоя. Понижение дна забоя вторичного хода обеспечивает более полное использование емкости, создаваемой на вторичном ходе посредством размещения верхней бровки навала первичного хода как можно выше на откосе забоя вторичного хода.

Применяется следующий алгоритм перебора с ветвлением:

$$v = f(B_i) \rightarrow \max, i = \{m, \dots, k\}, m \leq k \leq n \text{ – случай 2,}$$

$$S = f(B_i) \rightarrow \min, i = \{0, \dots, n\} \text{ – случай 1,}$$

где *случай 1* – существует такое положение бровки вторичного забоя V_i , при котором возможно решение задачи А) для обоих забоев; *случай 2* – есть решение А) для первичного забоя, но не отсутствует – для вторичного; n – минимально возможный шаг (уровень) понижения забоя



вторичного хода (по различным природным, техническим или технологическим факторам); m — первый шаг, на котором выполняется условие случая 2 (возможна выемка и укладка породы забоя первичного и вторичного хода); k — последний шаг, на котором выполняется условие случая 2; S — площадь забоя вторичного хода; v — скорость подвигания забоя вторичного хода.

В случае 2 производится переход на следующую итерацию вычислений. При этом задается и рассчитывается вариант модели формирования смежных ходов для полученного положения забоя вторичного хода на предыдущей итерации, а первичный ход предыдущей итерации становится последующим ходом. Таким образом, площадь вскрыши первичного хода исключается из дальнейшей итерации вычислений и для данного хода производится расчет только нижнего уровня. Именно при выявлении случая 2 формируются многоходовые (более двух) схемы.

Если задача В) решается посредством осуществления только двух смежных ходов экскаватора (рис. 3), то возможно решение задачи С), заключающейся в том, что разность скоростей подвигания забоев на смежных ходах должна стремиться к минимуму. Это дает возможность избежать ненужных простоев при параллельной работе двух экскаваторов:

$$|v1_i - v2_j| \rightarrow \min, i = \{m, \dots, k\},$$

где $v1$ — скорость подвигания забоя на первичном ходе; $v2$ — скорость подвигания забоя на вторичном ходе; m — верхняя Y-координата установки экскаватора на первичном ходе, при которой решается задача В); n — нижняя Y-координата экскаватора на первичном ходе, при которой решается задача В). Задача С) решается методом перебора, при этом на каждом шаге решается задача В).

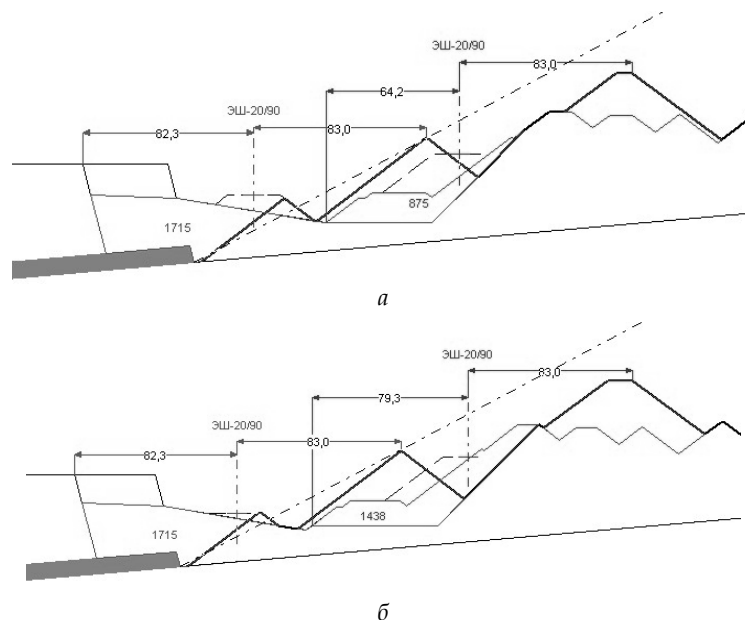


Рис. 3. Сравнение технологий переукладки вскрышной породы за два хода:
а — с максимальной скоростью подвигания вторичного забоя (задача В);
б — с минимальной разницей подвигания скоростей смежных забоев (задача С)



Заключение

Вышеописанные математические модели использовались при создании информационно-программного комплекса Minescal (№ 2008614085 в Реестре программ для ЭВМ от 27.08.2008). Программный комплекс предназначен для моделирования бестранспортной систем разработки взорванных вскрышных пород и используется в ряде сибирских проектных институтов. При этом сочетание аналитических (эмпирических), геометрических и численных методов математического моделирования, а также вышеописанная вложенность численных алгоритмов позволило использовать модульный принцип при разработке программного комплекса. Модульный принцип подразумевает в том числе возможность независимой замены (добавления) отдельных составляющих (программных модулей) комплекса.

Основное достоинство программного комплекса заключается в том, что с его помощью возможно построение технологических схем с неограниченным числом ходов, последовательное моделирование схем обработки нескольких блоков вкрест- и вдольпростирания пласта и т.д. Внедрение технологии будет основано на принципах аутсорсинга, подразумевающего удаленное решение задач специалистами НИИ на основе данных предприятия в сочетании с сопровождающим удаленным обучением специалистов предприятия.

Список литературы

1. *Справочник*. Открытые горные работы / К.Н. Трубецкой [и др.]. М., 1994.
2. *Щадов В.М.* Открытая разработка сложноструктурных угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока. М., 2004.
3. *Ботвинник А.А.* Интегрированная модель управления качеством выходного потока угля при открытой разработке свиты пластов // ФТПРПИ. 2010. № 3. С. 63–72.
4. *Шек В.М.* Объектно-ориентированное моделирование горнопромышленных систем. М., 2000.
5. *Капустин Ю.Е.* Информационные технологии планирования горных работ (для горных инженеров). СПб., 2004.

Об авторе

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

E-mail: INazarov@kantiana.ru

About author

Igor Nazarov — PhD, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: INazarov@kantiana.ru