

О.С. ЗЕЛЕНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., В.С. ЛИСЕНКО, канд. екон. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОВНОГО ПІДРАХУНКУ ЗАПАСІВ МЕТОДОМ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ НА РУДНИХ РОДОВИЩАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБ'ЄМНОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

Мета. Розробка методики та програмного забезпечення повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів з використанням моделювання денної поверхні кар'єру та вперше запропонованої об'ємної інтерполяції для рудних родовищ.

Методи дослідження. Методика реалізації повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів складається з наступних етапів: обробка свердловин детальної розвідки; побудова поверхонь кар'єру на початок і кінець відпрацювання; отримання контурів вертикальних перерізів; оконтурювання (визначення площі та якісних показників типів руд) в вертикальних перерізах; повний підрахунок запасів.

Наукова новизна. Вперше запропоновано використання об'ємної інтерполяції у 3D-просторі. По кожному вертикальному перерізу формується контур відпрацювання, який покривається інтерполяційною сіткою. Кожен вузол сітки визначається у 3D просторі відносно найближчих кернів свердловин сфери заданого радіусу пошуку. Це дозволяє підвищити оперативність та точність розрахунків. Такий підхід дозволяє враховувати рельєф поверхонь на відміну від кубічних моделей, які застосовуються у стандартних закордонних пакетах.

Практична значимість. Запропонована методика реалізації методів вертикальних перерізів для повного підрахунку запасів, яка може бути використана на кар'єрах Криворізького басейну. Вона представлена на прикладі кар'єру Південного ГЗКа. Відповідне програмне забезпечення може бути використано на родовищах зі складною структурою.

Результати. У якості інструментарію з розробки програмного забезпечення вибрано мову C++ на базі бібліотеки MFC інтегрованого середовища Microsoft Visual Studio 2019. Для обробки баз даних використано технологію ADO, для роботи з 3D-графікою – відкриту графічну бібліотеку OpenGL. Крім того, розроблено 3D-модуль аналізу кожного вузла сітки відносно найближчих кернів свердловин та організоване поповнення результуючої інформації по довільним профілям кар'єру, які задаються двома параметрами: відстань між профілями та кут нахилу. Це дає можливість порівняти результати при різних параметрах кутів та відстані між профілями та оцінити отримані результати.

Ключові слова: B-сплайн, NURBS-поверхня, повний підрахунок запасів, інтерполяція, OpenGL.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-8-15

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Ефективність розвитку відпрацювання та перспективного планування гірничих робіт на рудних кар'єрах залежить від точності повного (генерального) підрахунку запасів, що вимагає значних трудовитрат.

Аналіз досліджень та публікацій. Повний підрахунок запасів достатньо трудомісткий процес. Використання зарубіжних програмних пакетів не завжди ефективно для складноструктурних родовищ. У цих пакетах використовуються геостатистичні методи або методи зворотних відстаней на інформаційній основі блокових моделей. Геостатистичний метод може мати нестійкі варіограми, що призводить до значної похибки. Метод зворотних відстаней, який використовується для оцінки якості в центрі блоків, також не прийнятний при складній структурі родовища, оскільки для оконтурювання рудних тіл в ряді випадків недостатньо тільки якісних показників по кернах. Для таких умов доцільно використання традиційних методів горизонтальних і вертикальних перерізів з урахуванням їх модифікацій, моделювання денної поверхні кар'єру при повній автоматизації розрахунків.

Постановка задачі. Для рудних родовищ розробити методику та програмне забезпечення повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів з використанням моделювання денної поверхні кар'єру та вперше запропонованої об'ємної інтерполяції.

Викладення матеріалу та результати. Інформаційною основою для повного підрахунку запасів є цифрові моделі кар'єру (ЦМК) на початок і кінець відпрацювання, база даних (БД) по розвідувальних свердловинах, а також дані за профілями. ЦМК містять координати верхньої і нижньої брівки уступів кар'єру. База даних по розвідувальних свердловинах включає: дані координат усть свердловин, дані кернового опробування, дані по інклінометрії (азимутальні кути і кути нахилу свердловини). Дані кернового опробування по кожній свердловині містять інформацію: номер, інтервал опробування, результати опробування за якісними показниками. Крім того,

в таблиці БД виділено поле для кодування типу руди в інтервалі опробування. Це поле буде заповнюватися в процесі автоматизації розрахунків.

Запропонована методика реалізації методів вертикальних перерізів для повного підрахунку запасів, яка може бути використана на кар'єрах Криворізького басейну. Вона представлена на прикладі кар'єру Південного ГЗКа. Реалізація програмного забезпечення повного підрахунку запасів за даною методикою виконана на Visual C++ для ОС Windows. Для побудови тривимірної графіки використовуються інструментальні засоби відкритої графічної бібліотеки OpenGL. Це програмне забезпечення може бути використано на родовищах зі складною структурою.

Методика реалізації повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів складається з наступних етапів [1, 4]:

1. Обробка свердловин детальної розвідки.
2. Побудова поверхонь кар'єру на початок і кінець відпрацювання.
3. Отримання контурів вертикальних перерізів.
4. Оконтурювання (визначення площ і якісних показників типів руд) в вертикальних перерізах.
5. Повний підрахунок запасів.

На першому етапі обробляються всі глибокі свердловини. За вихідними даними глибоких колонкових свердловин детальної розвідки здійснюється розрахунок потужностей і змісту різних типів руд і порід, що вміщують по уступах кар'єру з урахуванням встановлених кондицій.

У модулі обробки глибоких свердловин передбачений контроль і аналіз вихідної інформації по опробуванню і інклінометрії. Здійснюється розрахунок по кожній свердловині детальної розвідки, при якому заданий інтервал опробування відноситься до руди або порожньої породи з урахуванням встановлених кондицій. При цьому для похилих свердловин довжини проб перераховуються з урахуванням кута нахилу свердловини. Можна отримати проекцію свердловини на довільний профіль (вертикальну площину). На рис. 1. показана проекція свердловини на профіль з азимутним кутом 80° . Темним кольором виділена руда, світлим – порожня порода. Крім того, передбачений аналіз опробування за кількісним показниками. На рис. 2. показана зміна якісних показників по глибині свердловини.

Після детальної обробки кожної глибокої свердловини відбувається їх запис в таблицю БД по свердловинах детальної та експлуатаційної розвідок по кожному горизонту. При цьому формується стільки записів, скільки уступів проходить глибока свердловина. Координати для кожного запису (координати точки перетину глибокої свердловини з площиною горизонту) обчислюються за формулами

$$X = X_0 + \sum_{i=1}^N \ell_i \sin \theta_i \cos \alpha_i ; \quad Y = Y_0 + \sum_{i=1}^N \ell_i \sin \theta_i \sin \alpha_i ,$$

де X_0, Y_0 – координати устя глибокої свердловини; ℓ_i – довжина i -го інтервалу виміру; θ_i і α_i – відповідно кут нахилу і азимутальний кут в i -му інтервалі вимірювання. Якісні показники обчислюються як середньозважені величини по переліченим довжинах проб, які знаходяться на висоті уступу вище проектного горизонту. Результати записів свердловин по горизонтах кар'єру використовуються для повного підрахунку запасів методом горизонтальних перерізів.

На другому етапі, використовуючи математичний апарат В-сплайнів, по вихідним даним брівок уступів цифрових моделей кар'єру будуються поверхні кар'єру відповідно на початок і кінець відпрацювання.

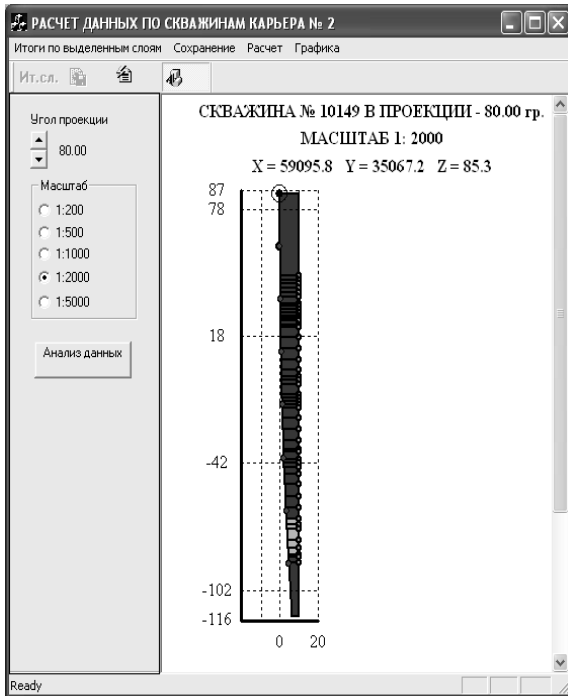


Рис. 1. Результат розрахунків по свердловині з врахуванням кондицій

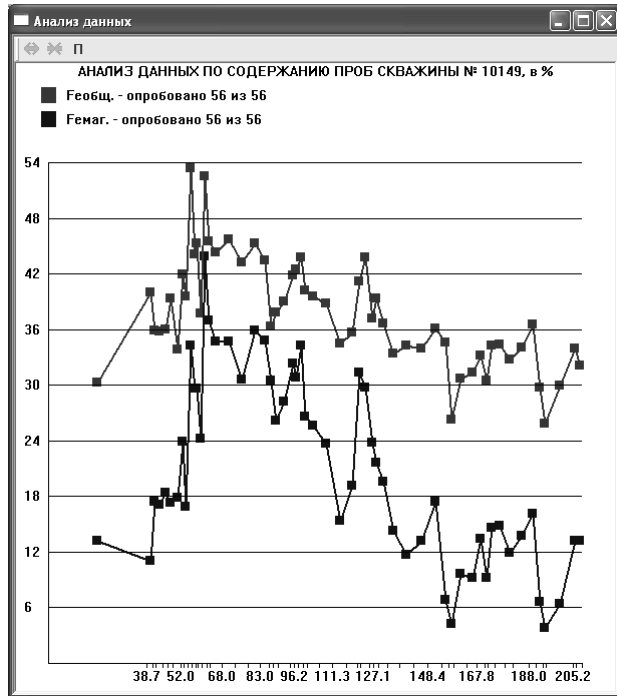


Рис. 2. Аналіз даних свердловини по вмісту проб

Перевагою побудови поверхні кар'єру є наявність в якості вихідних даних тільки координати X , Y , Z верхньої та нижньої брівки уступу, які містяться в ЦМК.

Результат отримання поверхні кар'єру на початок відпрацювання наведено на рис. 3.

Таким же чином будується поверхня на кінець відпрацювання. Це може бути план кар'єру на будь-яку іншу дату або проектні межі кар'єру. У нашому випадку це проектні межі кар'єру, тобто до яких пір планується вести видобуток руд в даному кар'єрі [2, 3].

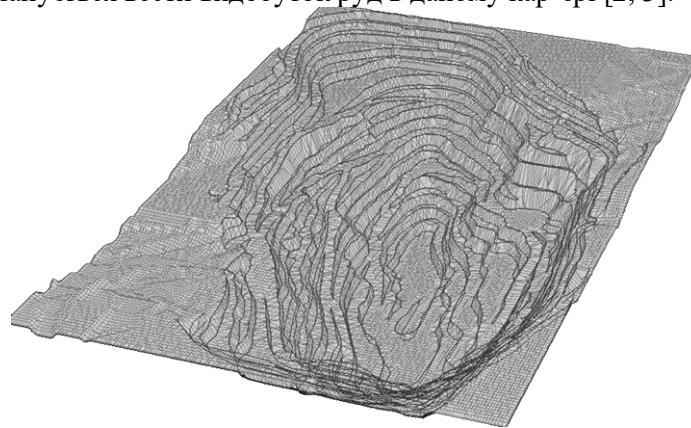


Рис. 3. Поверхня кар'єру на початок відпрацювання, побудована з використанням В-сплайнів

На наступному етапі визначаються контури вертикальних перерізів. Кожен вертикальний переріз зверху обмежений лінією перетину профілю з поверхнею кар'єру на початок періоду, бічними і нижньою лінією перетину профілю з поверхнею кар'єру на кінець періоду (проектні межі кар'єру).

Спочатку використовуються профілі, які надаються проектними організаціями. На профілях виділені контури рудних тіл, проектні межі кар'єру і свердловини. В результаті перетину профілю з поверхнями кар'єру на початок і кінець відпрацювання отримуємо контур для пошуку запасів.

Розглянемо перетин поверхні кар'єру заданим профілем більш детально. Слід зауважити, що при побудові поверхні кар'єру з використанням В-сплайнів, чотирикутник не завжди буде лежати в одній площині. Отже, доцільно розбити просторовий чотирикутник на два трикутника.

На рис. 4. в збільшеному вигляді покажемо в плані ті трикутники, які перетинає профіль. Кожен з трикутників має відповідне рівняння площини $Ax + By + Cz + D = 0$.

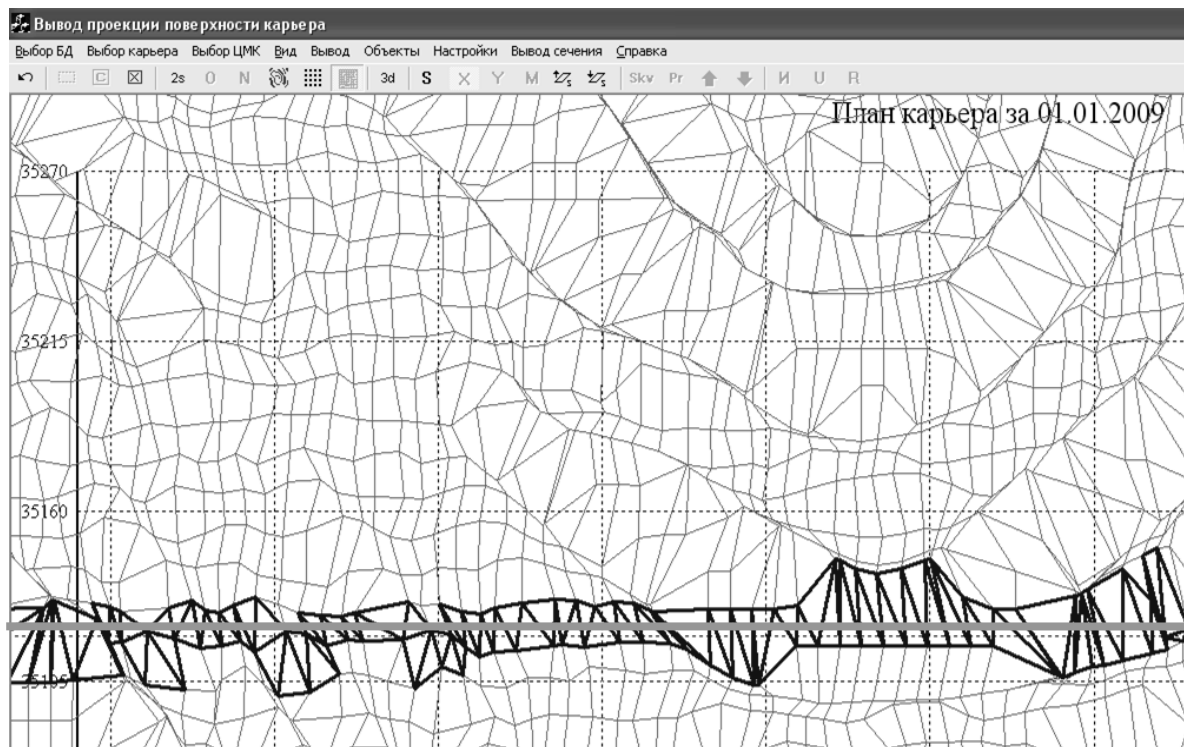


Рис. 4. Виведення трикутників, які перетинають профіль

Коефіцієнти рівняння розраховуються по наступним формулам

$$A = (y_1 - y_3)(z_2 - z_3) - (y_2 - y_3)(z_1 - z_3);$$

$$B = (x_2 - x_3)(z_1 - z_3) - (x_1 - x_3)(z_2 - z_3);$$

$$C = (x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3);$$

$$D = -(x_3A + y_3B + z_3C).$$

Спочатку знаходимо в плані координати перетину профілю і сторони трикутника – x , y , використовуючи формулу перетину прямих. Потім не представляє складності отримати координату z наступним чином

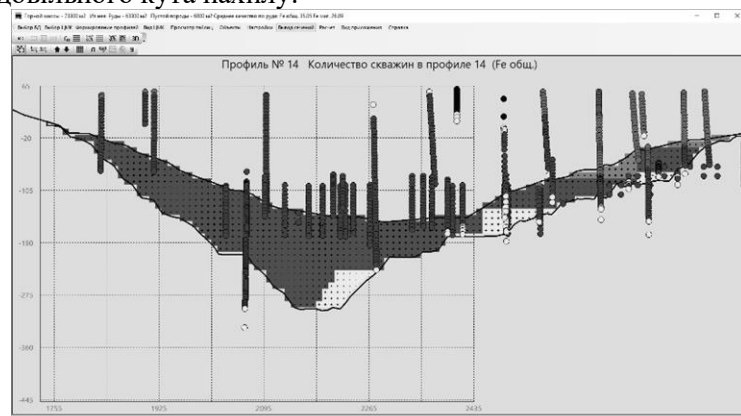
$$z = -(Ax + By + D)/C.$$

Вертикальні перерізи покриваються інтерполяційної сіткою. У кожному вузлі сітки оцінюється тип руди і якісні показники по найближчому керну глибокої свердловини. Інформація за типами руд є базисом для автоматизованого підрахунку запасів методом вертикальних перерізів в довільних профілях і дає можливість зробити порівняльний аналіз методики повного підрахунку запасів у профілях при завданні довільного кута нахилу.

Результат інтерполяції наведено на рис. 5.

Рис. 5. Результат інтерполяції з використанням контурів рудних тіл по перерізу № 14

Світлим кольором на рисунку виділена порожня порода, темним кольором – руда. Інтерполяція для кожного типу руди робиться щодо тільки тих кернів глибоких свердловин, які відносяться до певного типу руди (залістий горизонт). Сам тип руди визначається по найближчому керну свердловини.



По заданим перерізам вперше запропоновано застосування методу об'ємної інтерполяції, який дозволяє в 3D-просторі визначити значення якісного показника та з максимальною ефективністю вдосконалює типовий метод вертикальних перерізів.

По кожному вузлу у 3D-просторі розраховується показник Feob або Femag наступним чином, як показано на рис. 6.

Це відбувається за наступною формулою

$$Z_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N Z_k d_k^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^N d_k^{-\alpha}},$$

де N – кількість найближчих точок до вузла ij ; Z_k – значення відмітки у k -й точці; d_k – відстань до найближчої k -ї свердловини до вузла сітки ij ; α – показник ступеню інтерполяції.

Слід зазначити, що пошук відбувається відносно сфери, яка ділиться на n секторів, щоб врахувати просторове розміщення кернів свердловин. Рекомендується при розрахунках обирати вісім секторів.

При застосуванні інтерполяції користувачу надається можливість обрати параметри, представлені в діалозі для кожного перерізу (рис. 7).

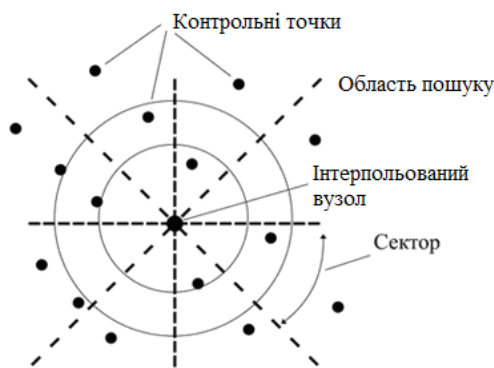


Рис. 6. Розрахунок інтерпольованого вузла у 3D-просторі

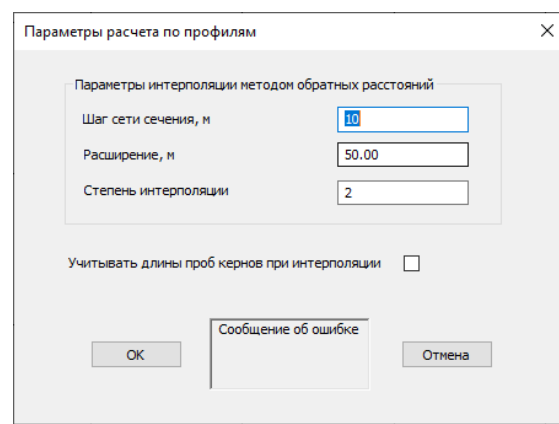


Рис. 7. Діалог параметрів розрахунку по профілям

У даному діалозі крім кроку сітки, розширення та ступені інтерполяції надається можливість врахування довжини проб кернів свердловин.

При такому врахуванні формула зміниться наступним чином.

$$Z_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N Z_k d_k^{-\alpha} dl_k}{\sum_{k=1}^N d_k^{-\alpha} dl_k},$$

де dl_k – значення довжини проби у k -й точці.

Так як інтерполяція відбувається у 3D-просторі, по кожному вузлу сітки надається можливість переглянути результати пошуку та наочно побачити лише ті найближчі керни свердловин, відносно яких і відбувався розрахунок, використовуючи метод зворотних відстаней.

На рис. 8. виведені керни свердловин, які є найближчими до виділеного вузла.

Передбачено наступні опції контекстного меню: відобразити площини, в кожній з яких відбувається пошук керну свердловини; відобразити лінію до найближчого керну; відобразити вузол сітки, відносно якого відбувається пошук; відобразити осі координат; повернення до першочергового стану.

За умовчанням виведені усі режими, окрім відображення площин. На рис. 9 продемонструємо виведення восьми площин, на які ділиться сфера для застосування об'ємної інтерполяції. Для того щоб наочно побачити найближчі керни свердловин, до площин застосовано режим прозорості.

Так, користувач може зробити повний візуальний аналіз розрахунку по вибраному вузлу сітки. 3D-режим дозволяє робити наступне: повертати сцену по осям координат, використовуючи клавіші курсору; наближати та віддаляти сцену за допомогою колеса мишки; користуватися контекстним меню.

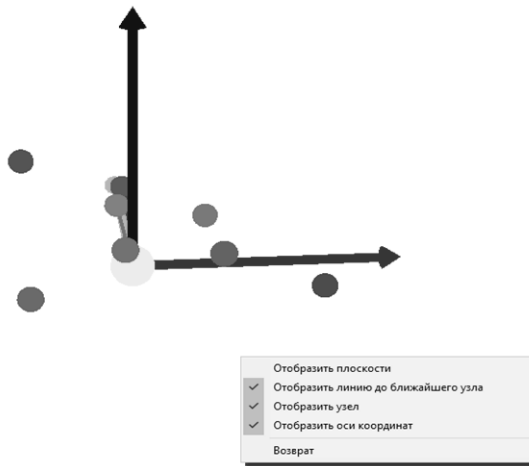


Рис. 8. Виведення найближчих кернів свердловин до вузла сітки у 3D-просторі

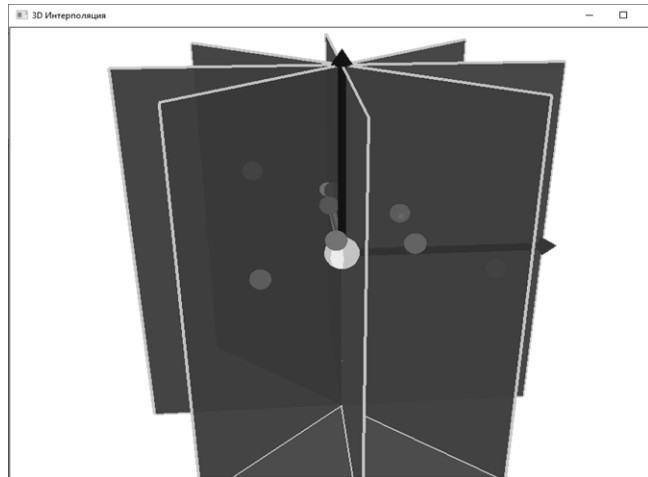


Рис. 9. Виведення найближчих кернів свердловин до вузла сітки у 3D-просторі з відображенням площин

Слід зауважити, що пошук вузла сітки відбувається оптимальним чином за допомогою функції PoiskUzel. Наведемо код даної функції.

```
//Функція пошуку індексу вузла сітки у векторі Pok_Set
//-1 мишка поза контуром
int CVertSect_15View::PoiskUzel(double x, double y, double hag)
{
    //Прив'язка до контурів
    double* x_k1, *y_k1, *x_k2, *y_k2;
    int kol1, kol2;
    kol1 = kontur_niz[0].size();
    x_k1 = kontur_niz[0].begin()._Ptr;
    y_k1 = kontur_niz[1].begin()._Ptr;
    kol2 = kontur_verx[0].size();
    x_k2 = kontur_verx[0].begin()._Ptr;
    y_k2 = kontur_verx[1].begin()._Ptr;
    //////////////////////////////////////
    //-1 при не потраплянні у контур
    if (!pDoc->Poisk_t(x_k1, y_k1, kol1, x, y, (float)hag)
        || !pDoc->Poisk_t(x_k2, y_k2, kol2, x, y, (float)hag))return -1;

    double left_side = x - hag;
    double right_side = x + hag;
    double uz_distance, min_distance;
    int i, pos, idx = -1;
    int kol_uz = Pok_set.size();
    Pok_Set *Pokset = Pok_set.begin()._Ptr;
    //Пошук свердловини методом половинного ділення
    pos = (int)(lower_bound(Pok_set.begin(), Pok_set.end(), left_side) -
    Pok_set.begin()) - 1;
    pos = (pos<0) ? 0 : pos;
    //////////////////////////////////////

    min_distance = 1e+300;
    //Цикл пошуку мінімального значення по вузлу
    for (i = pos; i < kol_uz && Pokset[i].x < right_side; i++)
    {
        uz_distance = (Pokset[i].x - x) * (Pokset[i].x - x) + (Pokset[i].y - y) *
        (Pokset[i].y - y);
        if (uz_distance < min_distance)
        {
            min_distance = uz_distance;
            idx = i;
        }
    }
    return idx;
}
}
```

Зроблено це з використанням предикатів та алгоритмів бібліотеки STL. Клас сітки Pok_Set є екземпляром класу vector та має в собі два предикати – один для сортування даних за допомогою стандартного алгоритму sort, а інший – для бінарного пошуку з використанням алгоритму lower_bound.

Нижче наведемо опис класу сітки Pok_Set з даними предикатами.

```
//Клас сітки
class Pok_Set
{
public:
    double x;
    double y;
    double feob;
    double femag;
    int sort;

    Pok_Set(double x = 0, double y = 0, double feob = 0, double femag = 0, int sort
= 0)
    {
        this->x = x;
        this->y = y;
        this->feob = feob;
        this->femag = femag;
        this->sort = sort;
    }

    //Предикат для lower_bound
    bool operator<(double xx) { return x < xx; }
    //Предикат для сортування
    bool operator<(Pok_Set& xx) { return x < xx.x; }
};
```

При формуванні сітки даний контейнер сортується за допомогою наступного рядка коду:

```
//Сортировка контейнера
sort(Pok_set.begin(), Pok_set.end());
////////////////////////////////////
```

Такий же механізм пошуку використано при застосуванні 3D-інтерполяції, де спочатку відбувається сортування кернів свердловин за координатою X, а потім методом половинного ділення відбувається пошук мінімальної та максимальної координати X для оптимального пошуку кернів свердловин, що потрапили до заданого радіусу пошуку.

Механізм застосування моделей класів в якості екземпляру динамічного контейнеру вектор разом з відповідними предикатами та стандартними алгоритмами бібліотеки STL дають ефективний механізм пошуку вузла сітки та застосування об'ємної інтерполяції у 3D-просторі.

Після підрахунку площ за типами руд кожного з вертикальних перерізів, не представляє складності отримати повний підрахунок запасів по кар'єру в цілому по відомим формулам в залежності від просторового розташування профілів. Об'єми щодо кожного перерізу обчислюються за формулою

$$V_n = \frac{S_1 + S_2}{2} h, \quad (1)$$

де S_1 та S_2 – площі сусідніх перерізів; h – висота між сусідніми перерізами.

У тому випадку, коли розглядаються профілі на границях кар'єру чи має місце перехід з одного рудного тіла на інше, об'єм може обчислюватися, як об'єм піраміди

$$V_n = \frac{1}{3} S_1 h. \quad (2)$$

Результати розрахунків перевірялися методом горизонтальних перерізів, а також методом підрахунку об'ємів на підставі моделювання поверхні кар'єру, як різницю двох поверхонь. Помилка сходження менше 1%.

Результати розрахунків виводяться у табличному вигляді та можуть бути збережені у форматі HTML або передані до пакетів Microsoft Word, Microsoft Excel.

Висновки та напрямки подальших досліджень. У якості інструментарію з розробки програмного забезпечення вибрано мову C++ на базі бібліотеки MFC інтегрованого середовища Microsoft Visual Studio 2019. Для обробки баз даних використано технологію ADO, для роботи з 3D-графікою – відкриту графічну бібліотеку OpenGL [7-10]. Крім того, розроблено 3D-модуль аналізу кожного вузла сітки відносно найближчих кернів свердловин та організоване поповнення результуючої інформації по довільним профілям кар'єру, які задаються двома параметрами: відстань між профілями та кут нахилу. Це дає можливість порівняти результати при різних параметрах кутів та відстані між профілями та оцінити отримані результати.

Список літератури

1. Автоматизация геолого-маркшейдерского обеспечения в информационной системе управления рудным карьером: монография / **А.С. Зеленский, С.В. Баран, В.С. Лысенко и др.** - Кривой Рог: Издательский центр ГВУЗ «КНУ», 2012.–362 с.
2. **Зеленский А.С.** Построение кривых и поверхностей при решении горно-геометрических задач / **А.С. Зеленский, В.С. Лысенко** // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг: КНУ. – 2013. – Вип. 34.–С. 225-232.
3. **Зеленский А.С.** Моделирование поверхности карьера с использованием B-сплайнов / **А.С. Зеленский, В.С. Лысенко, В.И. Мельничук** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2009. – № 23. – С. 50–54.
4. Автоматизация полного подсчета запасов на рудных месторождениях / **А.С. Зеленский, С.В. Баран, В.С. Лысенко, И.В. Хивренко** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2010. – №26. – С. 64 –68.
5. **Зеленский А.С.** Оконтуривание рудных тел с использованием B-сплайнов / **А.С. Зеленский, С.С. Пуханов, Т.А. Подойницyna** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2011. – № 27. – С. 59 –62.
6. **Зеленский А.С.** Использование NURBS поверхностей для автоматизированного построения изолиний изменчивости качественных показателей руды на карьерах / **А.С. Зеленский, С.С. Пуханов, В.И. Мельничук** // Науковий вісник НГУ.–2009.–№6.–С. 69–73.
7. **Ричард С. Райт, мл., Бенджамин Липчак** OpenGL. Суперкнига, 3-е издание.: Пер. с англ – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1040с.
8. **Хилл Ф.** OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов.– СПб.: Питер, 2002.– 1088 с.
9. **Дональд Херн, М. Паулин Бейкер** Компьютерная графика и стандарт OpenGL, 3-е издание.–М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.–1168 с.
10. **Роджерс Д., Адамс Дж.** Математические основы машинной графики: Пер. с англ.– М.: Мир, 2001.–604 с.

УДК 621.62-1+62-93+681.6

I. A. YAROVA, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Odesa Polytechnic National University

N. I. TSYVINDA, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kryvyi Rih National University

YU. V. YAROVYI, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Odesa Polytechnic National University

O. A. BONDAR, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Odesa Polytechnic National University

THE ANALYSIS OF WORKING ENVIRONMENT IN OPERATION OF 3D PRINTERS FOR FUSED DEPOSITION MODELLING

Purpose. The creation of safe working environment and the overall environmental footprint of 3D printing process is the relevant issue for the industry and other fields of human activity. The urgency of the research is due to the need to explore the working environment in operation of 3D printers for fused deposition modelling technology (FDM) as one of the most widespread.

Research methods. General theoretical methods (analysis, generalization, synthesis) are used in the study.