

УДК 622.831

РОЗПОДІЛ ОСІДАНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ У МУЛЬДІ ЗРУШЕННЯ

Кулібаба С.Б., Рожко М.Д.
(УкрНДМІ НАНУ, м. Донецьк, Україна)

Проведен краткий обзор известных методов определения граничных точек и расчета мульды сдвижения земной поверхности. На основе анализа экспериментальных данных установлена зависимость распределения вертикальных сдвижений и деформаций в мульде от базового расстояния между точками максимальных оседания и наклона земной поверхности.

The paper provides a brief review of the well-known methods to determine boundary points and calculate subsidence trough. Based on the analysis of experimental data, dependence of vertical subsidence and deformations in the trough on the basic distance among the points of maximum ground subsidence and slope is found.

При збільшенні глибини розробки величини зрушень і деформацій земної поверхні зменшуються, що викликає великі труднощі у визначенні розмірів і місця розташування мульди зрушення. Проведені раніше дослідження [1] дозволили встановити, що перспективним є метод визначення розмірів і місця розташування мульди зрушення з використання точок максимальних нахилів, а також визначити основні фактори, що впливають на їхню локалізацію й встановити вид і параметри залежності, що дозволяє розраховувати їхнє розташування на земній поверхні. Наступним завданням є виявлення закону розподілу вертикальних зрушень і деформацій у мульді зрушення, використовуючи точки максимального осідання й максимальних нахилів земної поверхні при її підробленні, як опорні.

Основною проблемою при визначенні граничних точок мультиди зрушення є вибір критерію границі ділянки земної поверхні, що зрушується. Фізичний зміст граничної точки в будь-якому вертикальному перетині складається в розмежуванні ділянок земної поверхні, що зрушуються й нерухомих ділянок при підробці. Однак у реальних умовах неможливо точно встановити координати такої точки із наступних основних причин. По-перше, результати вимірів за допомогою будь-яких найсучасніших і точних приладів і інструментів завжди обтяжені систематичними й випадковими погрішностями. По-друге, робочі й опорні репери натурних спостережних станцій у проміжках між серіями спостережень піддаються цілому комплексу зовнішніх впливів, не пов'язаних з підробленням (механічні впливи транспорту, сезонні зміни рівня ґрунту й т.п.).

Вимушений вихід зі сформованої ситуації полягає у використанні критеріального методу визначення границь мультиди зрушення, коли за граничні точки приймають точки земної поверхні, у яких зафіксовані певні критичні значення зрушень і деформацій. Однак, незважаючи на те, що такий підхід використаний у цілому ряді вітчизняних нормативно-методичних документів [2–4], він має важливий недолік – при його застосуванні розрахунковий розмір мультиди зрушення неминуче занижується [10], що негативно впливає на точність розрахунку всіх її параметрів.

Все це промовляє на користь відмови від граничних точок як опорних елементів при розрахунку мультиди зрушення, оскільки експериментально виявити граничну точку з нульовим зрушенням практично неможливо. Особливо яскраво це проявляється при розробці пластів на великих глибинах, оскільки в цих умовах величини зрушень і деформацій істотних ділянок земної поверхні мають значення, порівняні з похибками натурних інструментальних вимірів.

В той же час використовувані у вітчизняній практиці [2–4] методи розрахунку осідань у напівмультиди зрушення, як правило, засновані на застосуванні відомих функцій, зміна яких розглядається усередині чітко заданого інтервалу, розташованого між точкою максимального осідання в розглянутому перетині й граничною точкою напівмультиди, в якій зрушення й деформації відсутні.

Так, запропонована Авершиним С. Г. [5, 6] формула, що описує форму мульди осідань, хоч і містить у собі відстань l між точками максимальних осідання й нахилу, все-таки адаптована до границь мульди:

$$\eta_x = \eta_m \left(1 - \frac{x}{2,13l} \right)^{4,54} e^{2,13 \frac{x}{l}}, \quad (1)$$

де η_x – осідання точки в напівмульдї, що перебуває на відстані x від точки максимального осідання (η_m);

l – відстань від точки максимального осідання до точки перегину кривої осідання (тобто, до точки максимального нахилу в напівмульдї).

Тут передбачається, що відстань від точки максимального осідання до границі напівмульдї, тобто, її довжина, становить $2,13l$. При цьому автором не дається методика визначення величини l , а довжину напівмульдї пропонується визначати як відстань між її граничною точкою й точкою максимального осідання. Іншими словами, для розрахунку розподілу зрушень і деформацій у мульдї зрушення, так чи інакше, необхідно знати місце розташування її границь.

Основою методу типових кривих, використовуваного у вітчизняній практиці, є функції Гауса у вигляді, запропонованому Колбенковим С. П. [7], де також треба знати місце розташування граничних точок мульди зрушення.

В одному з варіантів рішення поставленого завдання, запропонованому Іофісом М. А. [8, 9], реалізується наступна схема математичного опису мульди зрушення. Спочатку на земній поверхні визначається місце розташування точок з максимальними кривизною, нахилом і осіданням, обчислюються відстані b між двома першими й d між двома останніми, які потім підставляються у вже відомі рівняння:

$$\eta_x = \frac{\eta_m}{2} \left[\Phi \left(\frac{x+d}{b} \right) + \Phi \left(\frac{x-d}{b} \right) \right], \quad (2)$$

де d – відстань від точки з максимальним осіданням до точки з максимальним нахилом у розглянутому вертикальному перетині;

x – поточна координата даної точки в даному перетині щодо точки з максимальним осіданням;

b – відстань від точки перегину до точки з максимальною кривизною земної поверхні.

На відміну від попередніх схем позитивним тут є те, що автори пропонують залежність для визначення положення точок максимальних нахилів (α , отже, і параметра d), отриману емпіричним шляхом:

$$\sigma_{1,2} = 90^{\circ} \mp 0,9\alpha + 15^{\circ} \cdot \left(0,7 \frac{D}{H}\right), \quad (3)$$

де $\sigma_{1,2}$ – кути максимальних нахилів, що представляють собою зовнішні щодо виробленого простору кути в головному вертикальному перетині мульди, утворені горизонтальними лініями й прямими, що з'єднують розглянуту границю очисної виробки із точками максимальних нахилів на земній поверхні відповідно з боку падіння й повстання;

α і D – відповідно кут падіння пласта в градусах і розмір очисної виробки в метрах, у розглянутому головному перетині мульди зрушення;

H – середня глибина розробки, м.

У той же час, даний метод має наступні основні недоліки. По-перше, як нами було показано раніше [1], у сучасних умовах розробки вугільних пластів на великих глибинах точність прогнозу за запропонованим засобом часто страждає похибками, джерелом яких в одних випадках є вплив неврахованих факторів, в інших – некоректний облік прийнятих в увагу факторів, що впливають. По-друге, для визначення параметра b , що дозволяє встановити місце розташування точки з максимальною кривизною, пропонується аналітичний спосіб, при якому використовуються розрахункові величини максимального осідання η_0 і максимального нахилу i_0 як вихідні дані. Однак прогноз цих величин сам по собі є окремим завданням геомеханіки, а відомі розрахун-

кові методи несуть у собі певні похибки визначення цих величин, що в остаточному підсумку також знижує ступінь точності розрахунків.

Розглядаючи підроблюваний масив гірських порід і, зокрема, його приповерхню зону, як суцільне середовище, ізотропне в горизонтальному напрямку, у якому зрушення й деформації змінюються безупинно, можна припустити, що граничної точки мульди зрушення в нашому розумінні взагалі не існує, а величини зрушень і деформацій наближаються до нуля асимптотично в напрямку від центра до крайових ділянок мульди.

Дослідимо розподіл осідань земної поверхні в напівмульді зрушення. На рис. 1 показаний графік фактичних нахилів земної поверхні, одержаний за наслідками інструментальних спостережень на спостережній станції 148 (шахта № 10, об'єднання "Первомайськуголь"). Звернемо увагу на наступні особливості графіка:

- криві нахилів в кожній з двох напівмульд не є симетричними відносно точок максимальних нахилів A і B (точок перегибів кривої осідання) – ділянки кривих, що знаходяться ближче до центру мульди (точка O) є крутішими, ніж ділянки, розташовані на периферії мульди;

- периферійні ділянки кривої нахилів (ділянки від точок A і B до країв профільної лінії) не перетинають в явному вигляді нульове значення, а лише наближаються до нього.

Аналогічна картина розподілу нахилів в мульді зрушення спостерігається і на інших спостережних станціях.

Відмова від граничних точок мульди зрушення як опорних елементів, необхідних для її розрахунку, вимагає адекватної заміни. Розглянемо як альтернативний варіант використання для цієї мети точок максимального нахилу (точки A і B на рис. 1). зокрема, проведемо зіставлення розміру напівмульди зрушення з деякою базовою відстанню s_0 , за яку приймемо довжину відрізка між точками з максимальними осіданням і нахилом (відрізки AO і OB на рис. 1). Для цього використовуємо результати натурних інструментальних спостережень.

З метою коректного зіставлення результатів, одержаних в різних умовах, приведемо досліджувані параметри до відносного вигляду. Для цього як параметр, що характеризує величину осі-

дання будь-якої i -ї точки η_i напівмульди, використовуємо її нормоване осідання η_{ni} :

$$\eta_{ni} = \frac{\eta_i}{\eta_m} \quad (4)$$

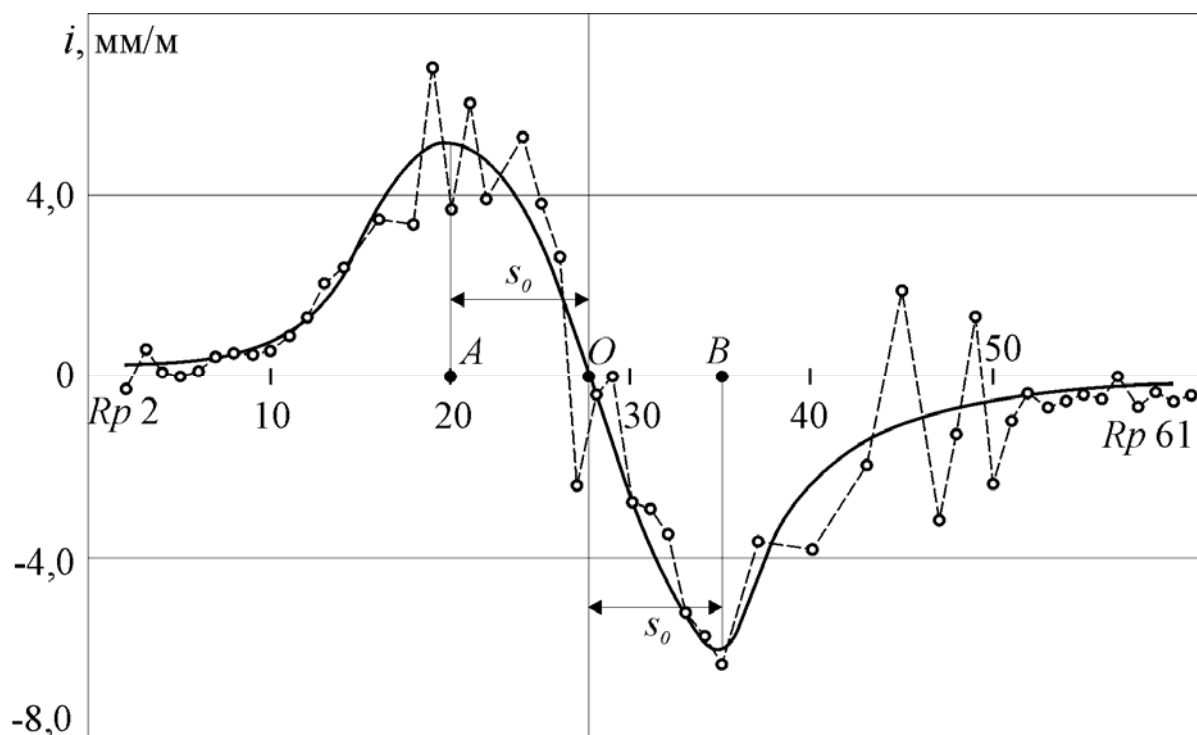


Рис. 1. Графік нахилів земної поверхні в районі спостережної станції № 148

Для опису місцеположення будь-якої точки в напівмульді зрушення скористаємося відносною лінійною координатою, що показує віддаленість цієї точки від точки максимального осідання в долях від базової відстані s_0 :

$$\rho_i = \frac{s_i}{s_0}, \quad (5)$$

де s_i – відстань від точки максимального осідання до i -ї точки напівмульди, м;
 s_0 – базова відстань, м.

Виходячи з геометричних співвідношень основних параметрів, що характеризують умови підробки, визначимо формули для обчислення базової відстані s_0 у головних перетинах мульди зрушення (рис. 2):

– над верхньою границею зони повних зрушень:

$$s_{0_{1(2)}} = \frac{D_1}{2} \cos \alpha \mp H \operatorname{ctg} \theta + l_{1(2)}, \quad (6)$$

– нижче верхньої границі зони повних зрушень:

$$s_{0_{1(2)}} = \left(H \pm \frac{D_1}{2} \sin \alpha \right) \cdot \operatorname{ctg}(\psi_{1(2)} \pm \alpha) + l_{1(2)}, \quad (7)$$

де $s_{0_{1(2)}}$ – базові відстані s_0 у напівмульдї за падінням (підйомом) пластів, м;

$l_{1(2)}$ – лінійний параметр локалізації точки максимального нахилу в напівмульдї за падінням (підйомом) пласта, м.

У головному перетині мульди за простяганням пласта (або при його горизонтальному заляганні) ці формули спростяться:

– над верхньою границею зони повних зрушень:

$$s_{0_3} = \frac{D_2}{2} + l_3, \quad (8)$$

– нижче верхньої границі зони повних зрушень:

$$s_{0_3} = H \operatorname{ctg} \psi_3 + l_3, \quad (9)$$

де s_{0_3} – базові відстані s_0 у напівмульдї за простяганням пласта, м;

l_3 – лінійний параметр локалізації точки максимального нахилу в напівмульдї за простяганням пласта, м.

У формулах (6) – (9) величина лінійного параметра локалізації точки максимального нахилу $l_{1(2,3)}$ негативна, якщо вона відкладається від проекції на земну поверхню границі очисної виробки убік центра даної виробки, і позитивна, якщо – у протилежну.

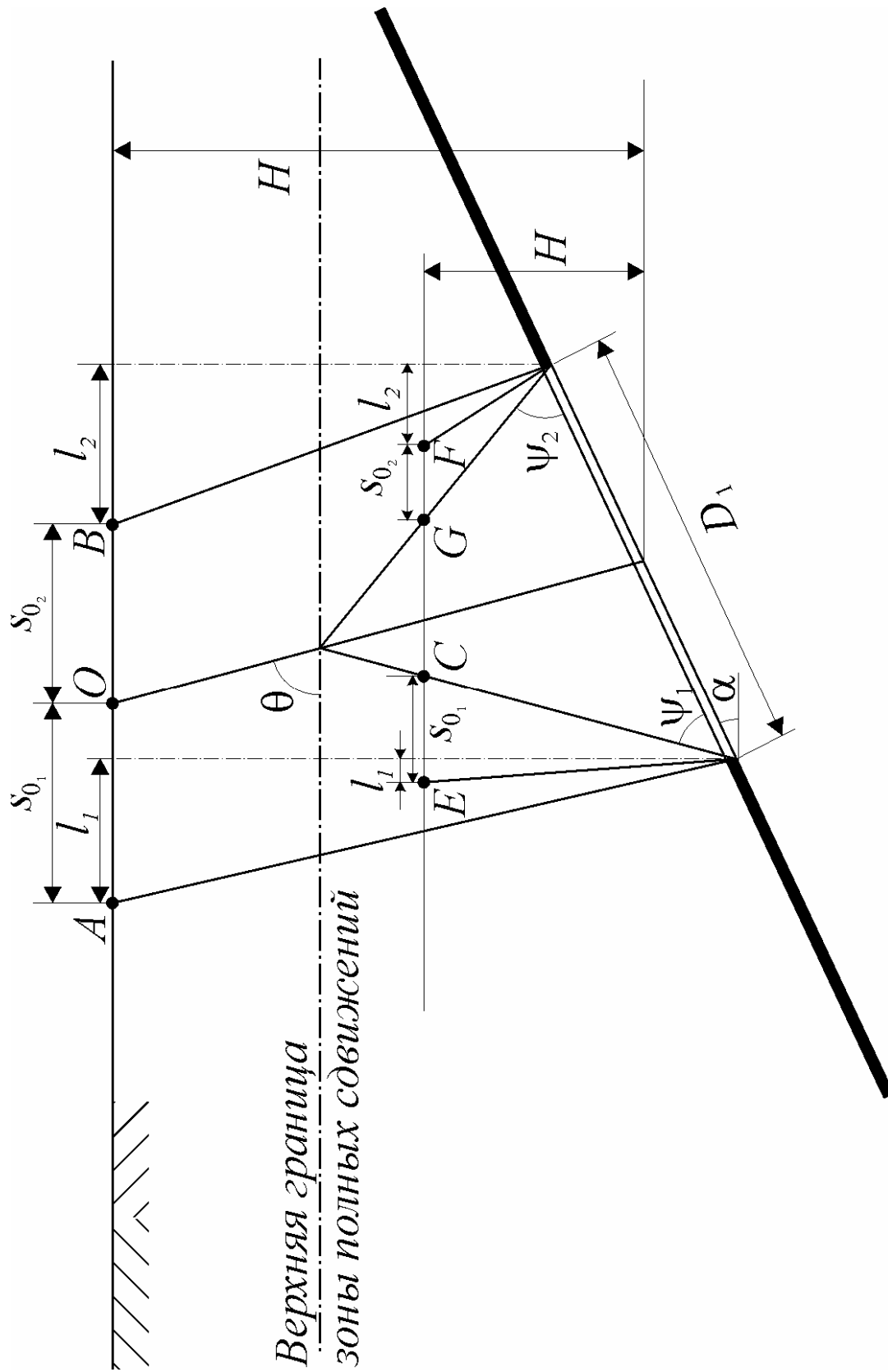


Рис. 2. Схема до визначення базової відстані s_0 :

O, C, G – точки максимальних осідань; A, B, E, F – точки максимальних нахилів

На рис. 3 показаний розподіл нормованих осідань 251 репера, що входять до складу 15 профільних ліній спостережних станцій, обладнаних у різних гірничо-геологічних умовах Донбасу, залежно від відносної лінійної координати ρ (див. (5)). Регресійний аналіз цього розподілу показав, що оптимально його можна описати підінтегральною функцією інтеграла ймовірності Гауса (10), яка задовольняє наступним основним вимогам, що впливають із прийнятої нами геомеханічної моделі зрушення земної поверхні:

- у точці максимального осідання ця функція повинна досягати локального екстремуму;
- точка її перегину, де перша похідна осідання по довжині напівмульди максимальна, повинна збігатися із точкою максимального нахилу;
- при видаленні від точки максимального нахилу до граничної області напівмульди зрушення вона повинна асимптотично наближатися до нуля:

$$\eta_n = \exp(-0,5\rho^2). \quad (10)$$

Враховуючи (4) формула для обчислення осідання i -ї точки земної поверхні η_i у даній напівмульді зрушення прийме наступний вигляд:

$$\eta_i = \eta_m \exp(-0,5\rho_i^2). \quad (11)$$

Статистичний аналіз показав, що емпіричне кореляційне відношення, яке характеризує ступінь концентрації розподілу фактичних точок навколо апроксимуючої функції (10), становить 0,72, що свідчить про досить високу тісноту зв'язку. Враховуючи при цьому досить широкий спектр умов проведення експериментів (глибина розробки – від 90 до 1080 м; кут падіння – від 0 до 57°; розмір очисної виробки – від 85 до 1100 м; потужність наносів – від 0 до 30 м), можна вивести, що базову відстань s_0 припустимо використати в якості універсального опорного параметра для визначення розмірів і форми мульди зрушення земної поверхні.

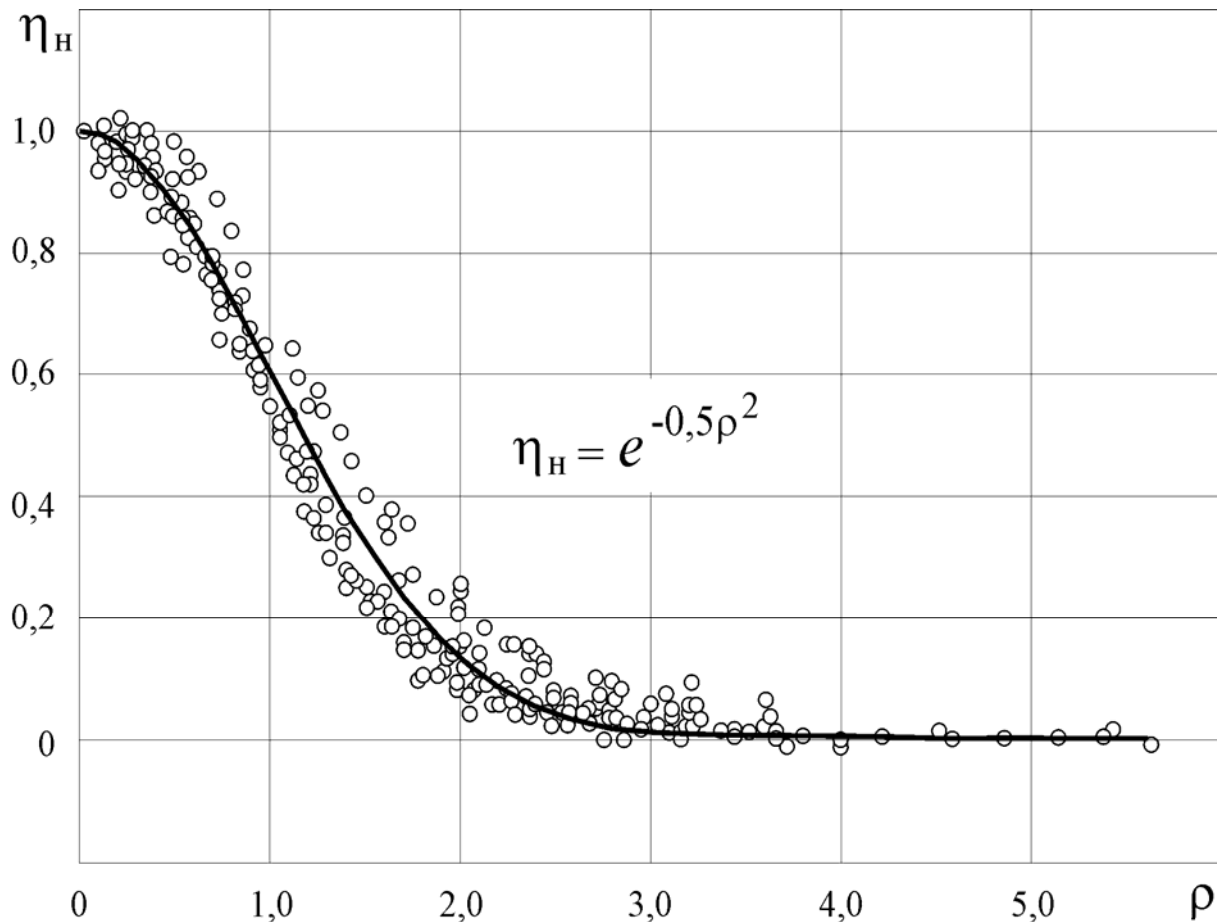


Рис. 3. Розподіл нормованих осідань у напівмульдї зрушення

Послідовно диференціюючи функцію (11), враховуючи (5), одержимо формули для розрахунку нахилів і кривизни земної поверхні в розглянутій напівмульдї:

$$i = \frac{d\eta}{ds} = -\frac{\eta_m}{s_0} \rho \cdot \exp(-0,5\rho^2);$$
$$K = \frac{d^2\eta}{ds^2} = \frac{\eta_m}{s_0^2} (\rho^2 - 1) \exp(-0,5\rho^2). \quad (12)$$

ВИСНОВКИ

В сучасних умовах підземної розробки вугільних пластів у Донбасі точність визначення місця розташування й розмірів мульдї зрушення на земній поверхні зменшується. Це пов'язане з

тим, що у застосовуваних у вітчизняній практиці методах розрахунку як вихідні дані використовуються координати граничних точок мульди зрушення, точне визначення яких зі збільшенням глибини розробки стає усе більше проблематичним.

Одним з можливих шляхів рішення цієї проблеми є використання точок максимальних нахилів земної поверхні в мульді зрушення. При цьому базову відстань, вимірювану між точками з максимальними осіданням і нахилом, можна використовувати як універсальний опорний параметр для визначення розмірів і форми мульди зрушення земної поверхні.

Встановлено, що залежність величини осідання будь-якої точки земної поверхні в напівмульді зрушення від її відносної лінійної координати, що визначає далекість даної точки від центра мульди зрушення в частках від базової відстані, може бути описана експонентою, що є підінтегральною функцією інтеграла ймовірності Гауса.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кулибаба С.Б., Рожко М.Д., Хохлов Б.В. Определение точек максимальных наклонов в мульде сдвижения // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-геологічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008.
2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / Министерство угольной промышленности СССР. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
3. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в Донецком угольном бассейне/ Минуглепром СССР.- М., 1972. – 130 с.
4. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.00159226.001-2003: Затв. Мінпаливенерго України 28.11.2003. – Київ, 2004. – 128 с.
5. Авершин С.Г. Сдвижение горных пород при подземных разработках. – М.: Углетехиздат, 1947. – 275 с.

6. Авершин С.Г., Кузнецов М.А. Расчет элементов сдвижения поверхности в условиях разработок пологопадающих пластов // Труды Всесоюзного научно-исследовательского маркшейдерского института «ВНИМИ». – М.: Углетехиздат, 1948. – С. 8 - 62.
7. Сдвижение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений / Акимов А.Г., Земисев В.Н., Кацнельсон Н.Н., Коротков М.В., Костенич В.С., Медянцеv А.Н., Мурашев А.Н., Петухов И.А. – М.: Недра, 1970. – 224 с.
8. Иофис М.А., Черняев В.И. Определение вертикальных сдвижений и деформаций земной поверхности при выемке наклонных и крутопадающих пластов // Горный журнал. – 1979. – № 6. – С. 20-22.
9. Иофис М.А., Шмелев А.И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М.: Недра, 1985. – 248 с.
10. Кулибаба С.Б. О границах мульды сдвижения // Сдвижение земной поверхности и устойчивость откосов. – Л.: ВНИМИ. – 1980. – С. 57 - 60.