

Расчет оседаний земной поверхности с использованием точек максимальных наклонов

Рожко М. Д.*

УкрНИМИ НАН Украины

Поступила в редакцию 20.11.08, принята к печати 01.11.09.

Аннотация

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 расстояния между точками максимальных оседания и наклона земной поверхности.

Ключевые слова: мульда, сдвижения, деформация, оседание, земная поверхность.

Уменьшение величин сдвижений и деформаций земной поверхности, являясь одним из следствий увеличения глубины разработки угольных пластов, вызывает большие трудности в определении размеров и местоположения мульды сдвижения.

Это связано с применением критериального метода определения ее границ, точность которого снижается в условиях малых величин деформаций. Так, на рис. 1 показаны графики наклонов земной поверхности, где наблюдается эффект "сползания" граничных точек мульды по направлению к ее центру (из точек A_1 и B_1 в точки A_2 и B_2 соответственно) с уменьшением деформаций подрабатываемой земной поверхности при постоянной величине критерия границы мульды ($\pm 0,5 \times 10^{-3}$), регламентированной действующим нормативным документом [4]. В результате такого эффекта происходит мнимое уменьшение размера мульды LM_1 до величины LM_2 при прочих равных условиях подработки, что противоречит известным моделям сдвижения земной поверхности, а также результатам экспериментальных исследований.

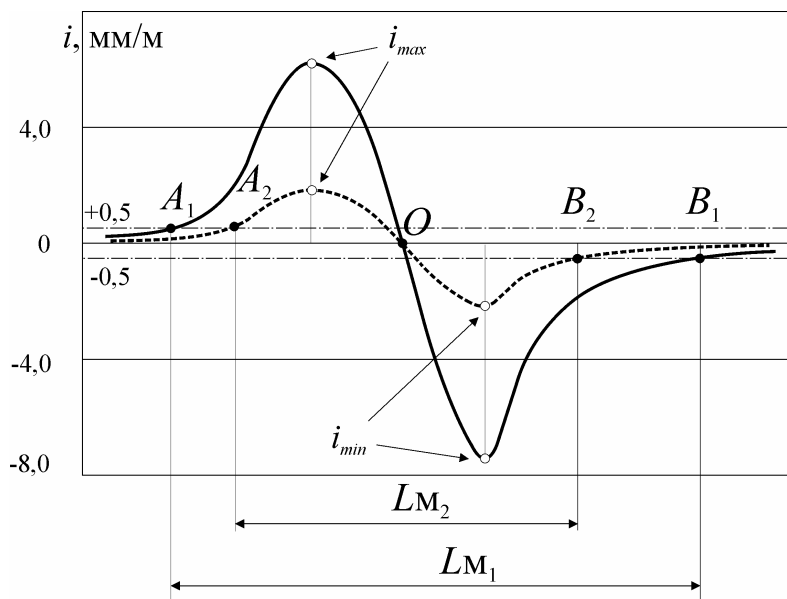


Рис. 1. К определению границ мульды сдвижения

* E-mail: ggf@mine.dgtu.donetsk.ua

Проведенные ранее исследования [1] позволили установить, что перспективным является метод определения размеров и местоположения мульды сдвижения с использованием точек максимальных наклонов, а также определить основные факторы, влияющие на локализацию этих точек и установить вид и параметры зависимости, позволяющей прогнозировать их положение на земной поверхности. Следующей задачей является выявление закона распределения вертикальных сдвижений и деформаций в мульде сдвижения, используя в качестве опорных точки максимальных наклонов земной поверхности при ее подработке.

Основной проблемой при определении граничных точек мульды сдвижения является выбор критерия границы сдвигающегося участка земной поверхности. Физический смысл граничной точки мульды в любом вертикальном ее сечении состоит в разграничении сдвигающегося и неподвижного участков земной поверхности при подработке. Однако в реальных условиях невозможно точно установить координаты такой точки по следующим основным причинам. Во-первых, результаты измерений с помощью любых самых современных и точных приборов и инструментов всегда отягощены систематическими и случайными погрешностями. Во-вторых, рабочие и опорные реперы натуральных наблюдательных станций в промежутках между сериями наблюдений подвержены целому комплексу внешних воздействий, не связанных с подработкой (механические воздействия транспорта, сезонные изменения уровня грунта и т.п.). Поэтому использование упомянутого выше критериального метода определения границ мульды сдвижения, когда за граничные принимают те точки земной поверхности, в которых измеренные сдвижения и деформации не превышают определенных критических значений, явилось вынужденным выходом из сложившейся ситуации. Однако, несмотря на то, что такой подход использован в целом ряде отечественных нормативно-методических документов [2–4], он имеет важный недостаток – при его применении расчетный размер мульды сдвижения неизбежно занижается [5], что отрицательно сказывается на точности расчета всех ее параметров.

Все это говорит о том, что использование граничных точек в качестве опорных элементов при расчете мульды сдвижения является неэффективным, поскольку экспериментально выявить граничную точку с нулевым сдвижением практически невозможно. Особенно ярко это ощущается при разработке пластов на больших глубинах, поскольку в этих условиях величины сдвижений и деформаций существенных участков земной поверхности имеют значения, сопоставимые с погрешностями натуральных инструментальных измерений.

В то же время используемые в отечественной практике [2–4] методы расчета оседаний в полумульде сдвижения, как правило, основаны на применении известных функций, изменение которых рассматривается внутри четко заданного интервала, расположенного между точкой максимального оседания в рассматриваемом сечении и граничной точкой полумульды, в которой сдвижения и деформации отсутствуют. Так, формула Авершина С.Г. [6, 7], описывающая форму мульды оседаний, хоть и включает в себя расстояние между точками максимальных оседания и наклона, все же адаптирована к границам мульды. А основой метода типовых кривых, используемого в упомянутых выше нормативных документах, являются функции Гаусса в виде, предложенном Колбенковым С.П. [8], где также необходимо знать местоположение граничных точек мульды сдвижения.

В одном из вариантов решения рассматриваемой задачи [9, 10] реализуется следующая схема математического описания мульды сдвижения. На земной поверхности определяют местоположение точек с максимальными кривизной, наклоном и оседанием и вычисляют расстояния между ними, которые затем подставляют в уже известные аналитические выражения для расчета оседаний в мульде сдвижения. В отличие от предыдущих схем положительным здесь является то, что авторы предлагают конкретную зависимость для определения положения точек максимальных наклонов, полученную эмпирическим путем:

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

где $\sigma_{1,2}$ – углы максимальных наклонов, представляющих собой внешние относительно выработанного пространства углы в главном вертикальном сечении мульды, образованные горизонтальными линиями и прямыми, соединяющими рассматриваемую границу очистной выработки с точками максимальных наклонов на земной поверхности соответственно со стороны

падения и восстания; α и D – соответственно угол падения пласта в градусах и размер очистной выработки в метрах, в рассматриваемом главном сечении мульды сдвижения; H – средняя глубина разработки, м.

В то же время, данный метод обладает рядом недостатков. Во-первых, как нами было показано ранее [1], в современных условиях разработки угольных пластов на больших глубинах точность прогноза по предложенному способу часто страдает погрешностями, источником которых в одних случаях является влияние неучтенных факторов, в других – некорректный учет принимаемых во внимание влияющих факторов. Во-вторых, для определения параметра, позволяющего установить местоположение точки с максимальной кривизной, предлагается аналитический способ, при котором в качестве исходных данных используются расчетные величины максимального оседания и максимального наклона. Однако прогноз этих величин сам по себе является отдельной задачей геомеханики, а известные расчетные методы несут в себе определенные погрешности определения этих величин, что в конечном итоге также снижает степень точности расчетов.

Рассматривая подрабатываемый массив горных пород и, в частности, его приповерхностную область, как сплошную среду, изотропную в горизонтальном направлении, в которой сдвижения и деформации меняются непрерывно, можно предположить, что граничной точки мульды сдвижения в нашем понимании вообще не существует, а величины сдвижений и деформаций асимптотически приближаются к нулю в направлении от центра к краевым участкам мульды. Исследуем распределение оседаний земной поверхности в полумульде сдвижения. На рис. 2 показан график фактических наклонов земной поверхности, полученный по результатам инструментальных наблюдений на наблюдательной станции 148 (шахта № 10, объединение «Первомайскуголь»). Обратим внимание на следующие особенности графика:

- кривые наклонов в каждой из двух полумульд не являются симметричными относительно точек максимальных наклонов A и B (точек перегибов кривой оседания) – участки кривых, находящиеся ближе к центру мульды (точка O) являются более крутыми, чем участки, расположенные на периферии мульды;
- периферийные участки кривой наклонов (участки от точек A и B к краям профильной линии) не пересекают в явном виде нулевое значение, а лишь приближаются к нему.

Аналогичная картина распределения наклонов в мульде сдвижения наблюдается и на других наблюдательных станциях.

Отказ от граничных точек мульды сдвижения как опорных элементов, необходимых для ее расчета, требует адекватной замены. Рассмотрим как альтернативный вариант использование для этой цели точек максимального наклона (точки A и B на рис.2). В частности, проведем сопоставление размера полумульды сдвижения с некоторым базовым расстоянием s_0 , в качестве которого примем длину отрезка между точками с максимальными оседанием и наклоном (отрезки AO и OB на рис. 2). Для этого используем результаты натуральных инструментальных наблюдений. С целью корректного сопоставления результатов, полученных в разных условиях, приведем исследуемые параметры к относительному виду. Для этого в качестве параметра, характеризующего величину оседания любой i -й точки полумульды, используем ее нормированное оседание η_i :

$$\eta_{ni} = \frac{\eta_i}{\eta_m}, \quad (2)$$

где η_m – максимальное оседание в данной мульде сдвижения.

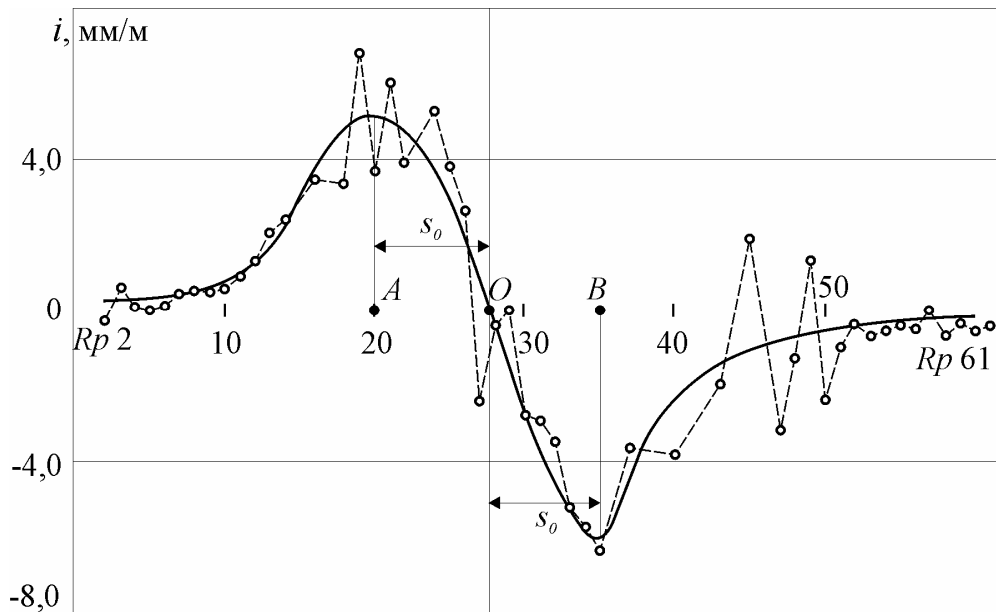


Рис. 2. График наклонов земной поверхности в районе наблюдательной станции № 148

Для описания местоположения любой точки в полумульде сдвига воспользуемся относительной линейной координатой ρ , показывающей удаленность этой точки от точки максимального оседания в долях от базового расстояния s_0 :

$$\rho_i = \frac{s_i}{s_0}, \quad (3)$$

где s_i – расстояние от точки максимального оседания до i -й точки полумульды, м; s_0 – базовое расстояние, м.

Исходя из геометрических соотношений основных параметров, характеризующих условия подработки, определим формулы для вычисления базового расстояния s_0 в главных сечениях мульды сдвига (рис. 3):

– над верхней границей зоны полных сдвижений:

$$s_{0_{1(2)}} = \frac{D_1}{2} \cos \alpha \mp H \operatorname{ctg} \theta + l_{1(2)}, \quad (4)$$

– ниже верхней границы зоны полных сдвижений:

$$s_{0_{1(2)}} = \left(H \pm \frac{D_1}{2} \sin \alpha \right) \cdot \operatorname{ctg}(\psi_{1(2)} \pm \alpha) + l_{1(2)}, \quad (5)$$

где $s_{0_{1(2)}}$ – базовые расстояния s_0 в полумульде по падению (восстанию) пласта, м; $l_{1(2)}$ – линейный параметр локализации точки максимального наклона в полумульде по падению (восстанию) пласта, м.

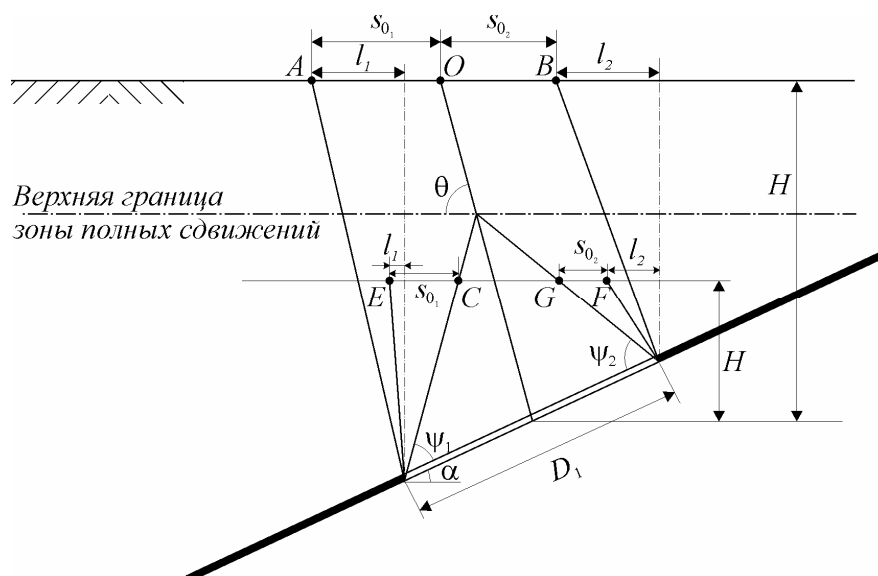


Рис. 3. Схема к определению базового расстояния s_0 : O, C, G – точки максимальных оседаний; A, B, E, F – точки максимальных наклонов

В главном сечении мульды по простиранию пласта (или при его горизонтальном залегании) эти формулы упростятся:

– над верхней границей зоны полных сдвижений:

$$s_{03} = \frac{D_2}{2} + l_3, \quad (6)$$

– ниже верхней границы зоны полных сдвижений:

$$s_{03} = H \operatorname{ctg} \psi_3 + l_3, \quad (7)$$

где s_{03} – базовые расстояния s_0 в полумульде по простиранию пласта, м; l_3 – линейный параметр локализации точки максимального наклона в полумульде по простиранию пласта, м.

Примечание. В формулах (4) – (7) величина линейного параметра локализации точки максимального наклона $l_{1(2,3)}$ отрицательна, если она откладывается от проекции на земную поверхность границы очистной выработки в сторону центра данной выработки, и положительна, если – в противоположную.

На рис. 4 показано распределение нормированных оседаний 251 репера, входящих в состав 15 профильных линий наблюдательных станций, оборудованных в различных горно-геологических условиях Донбасса, в зависимости от относительной линейной координаты ρ (3). Регрессионный анализ этого распределения показал, что оптимально его можно описать экспонентой, являющейся подынтегральной функцией интеграла вероятности Гаусса (8), которая удовлетворяет следующим основным требованиям, вытекающим из принятой нами геомеханической модели сдвига земной поверхности (см. рис. 4):

- в точке максимального оседания эта функция должна достигать локального экстремума;
- точка ее перегиба, где первая производная оседания по длине полумульды максимальна, должна совпадать с точкой максимального наклона;
- при удалении от точки максимального наклона к граничной области полумульды сдвига она должна асимптотически приближаться к нулю:

$$\eta_n = \exp(-0,5\rho^2). \quad (8)$$

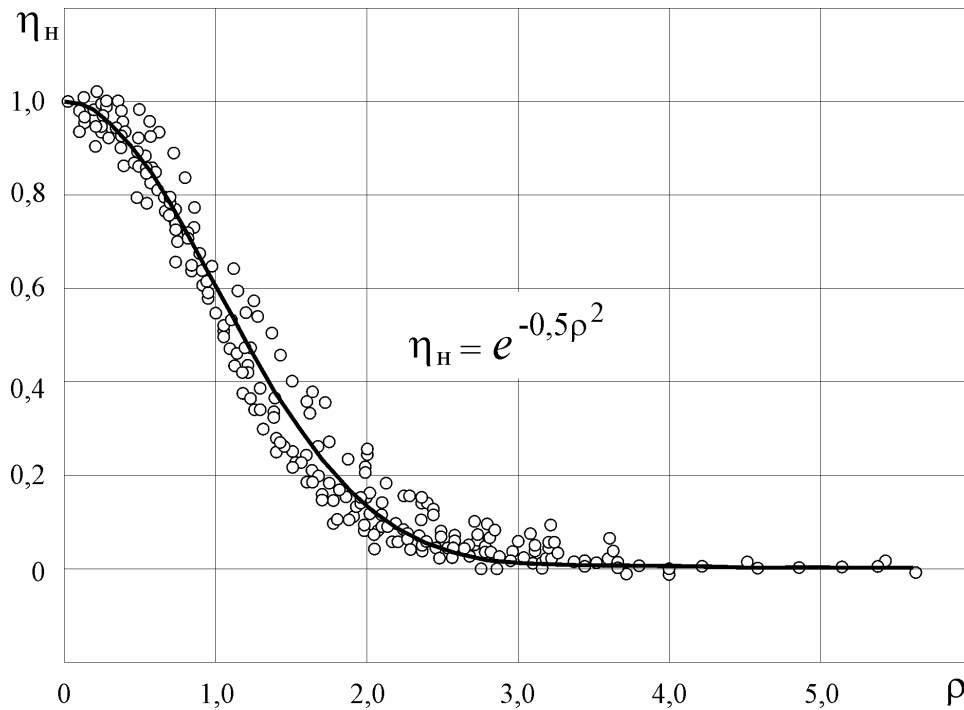


Рис. 4. Распределение нормированных оседаний в полумульде сдвижения

С учетом выражения (2) формула для вычисления оседания i -й точки земной поверхности η_i в данной полумульде сдвижения примет следующий вид:

$$\eta_i = \eta_m \exp(-0,5\rho_i^2), \quad (9)$$

Статистический анализ показал, что эмпирическое корреляционное отношение, характеризующее степень концентрации распределения фактических точек вокруг аппроксимирующей функции (8), составляет 0,72, что говорит о достаточно высокой тесноте связи. Учитывая при этом достаточно широкий спектр условий проведения экспериментов (глубина разработки – от 90 до 1080 м; угол падения – от 0 до 57°; размер очистной выработки – от 85 до 1100 м; мощность наносов – от 0 до 30 м), можно заключить, что базовое расстояние s_0 допустимо использовать в качестве универсального опорного параметра для определения размеров и формы мульды сдвижения земной поверхности.

Выводы

Одним из возможных путей решения проблемы повышения точности определения местоположения и размеров мульды сдвижения на земной поверхности при больших глубинах разработки является использование точек максимальных наклонов мульды сдвижения. Экспериментально доказано, что базовое расстояние, измеряемое между точками с максимальными оседанием и наклоном, можно использовать в качестве исходного параметра для определения размеров и формы мульды сдвижения земной поверхности.

Установлено, что зависимость величины оседания любой точки земной поверхности в полумульде сдвижения от ее относительной линейной координаты, показывающей удаленность данной точки от центра мульды в долях от базового расстояния, может быть описана подынтегральной функцией интеграла вероятности Гаусса.

Библиографический список

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. – В печати.

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. ГСТУ 101.00159226.001-2003: Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: Затв. Мінпаливенерго України 28.11.2003. – Київ, 2004. – 128 с.
5. Кулибаба С.Б. О границах мульды сдвижения // Сдвижение земной поверхности и устойчивость откосов. – Л.: ВНИМИ. – 1980. – С. 57 - 60.
6. Авершин С.Г. Сдвижение горных пород при подземных разработках. – М.: Углетехиздат, 1947. – 275 с.
7. Авершин С.Г., Кузнецов М.А. Расчет элементов сдвижения поверхности в условиях разработок пологападающих пластов // Труды Всесоюзного научно-исследовательского маркшейдерского института «ВНИМИ». – М.: Углетехиздат, 1948. – С. 8 - 62.
8. Сдвижение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений / Акимов А.Г., Земисев В.Н., Кацнельсон Н.Н., Коротков М.В.и др. – М.: Недра, 1970. – 224 с.
9. 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.
10. Иофис М.А., Шмелев А.И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М.: Недра, 1985. – 248 с.

© Рожко М. Д., 2010.

Анотація

Проведено короткий огляд відомих методів визначення граничних точок та розрахунку мульди зсуву земної поверхні. На основі аналізу експериментальних даних встановлена залежність розподілення вертикальних зміщень та деформацій в мульді від відстані між точками максимального осаду і нахилу земної поверхні .

Ключеві слова: мульда, зсув, деформація, осад, земна поверхня.

Abstract

Brief description of known methods for boundary point estimation and mould calculation are presented. Based on experimental data, dependence of deformations in mould from points of max yield are obtained.

Keywords: mould, yield, deformation, earth surface.