

УДК 622.834:551.43

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗА ДЕФОРМАЦИЙ СКЛОНОВ МЕЗОРЕЛЬЕФА ПРИ ИХ ПОДРАБОТКЕ ПОДЗЕМНЫМИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ

Грищенко Н. Н.
(ГВУЗ "ДонНТУ", Украина),
Шнеер В. Р., Блинникова Е. В.
(УкрНИМИ НАН Украины)

Розроблена математична модель для прогнозу зрушень та деформацій земної поверхні на місцевості з крутими укосами, тобто на схилах мезорельєфу. Модель заснована на гіпотезі про взаємозв'язок зрушення ґрунтового шару та корінних порід при підробці земної поверхні гірничими роботами.

There is developed the mathematical model for forecasting subsidence and deformation of earth surface in hilly regions, i.e. on mesorelief slopes. This model is based on the hypothesis on interaction of topsoil and ledge rocks under earth surface undermining.

1. Учет влияния мезорельефа

Деформации земной поверхности, возникающие при отработке угольных пластов и вызванным этим сдвижением горного массива, способны вызвать значительные повреждения зданий, сооружений, инженерных коммуникаций, попавших в зону влияния горных работ. В связи с этим отработку запасов угля под объектами поверхности, требующими защиты от влияния горных работ, производят по специальным проектам подработки данных объектов. Эти проекты содержат прогноз оседаний и деформаций земной поверхности, вызванных влиянием горных работ, оценку степени их воздействия на охраняемые объекты и рекомендации по мерам защиты объектов.

Существующая методика расчета деформаций земной поверхности, изложенная в отраслевом стандарте "Правила подработки..." [1], предусматривает расчет оседаний и деформаций в мульде сдвижения для постоянного значения средней глубины разработки. В этом случае расчет деформаций выполняется для некоторой горизонтальной плоскости, отстоящей от центра очистной выработки на расстоянии, равном средней глубине разработки $H_{\text{ср}}$ (рис. 1).

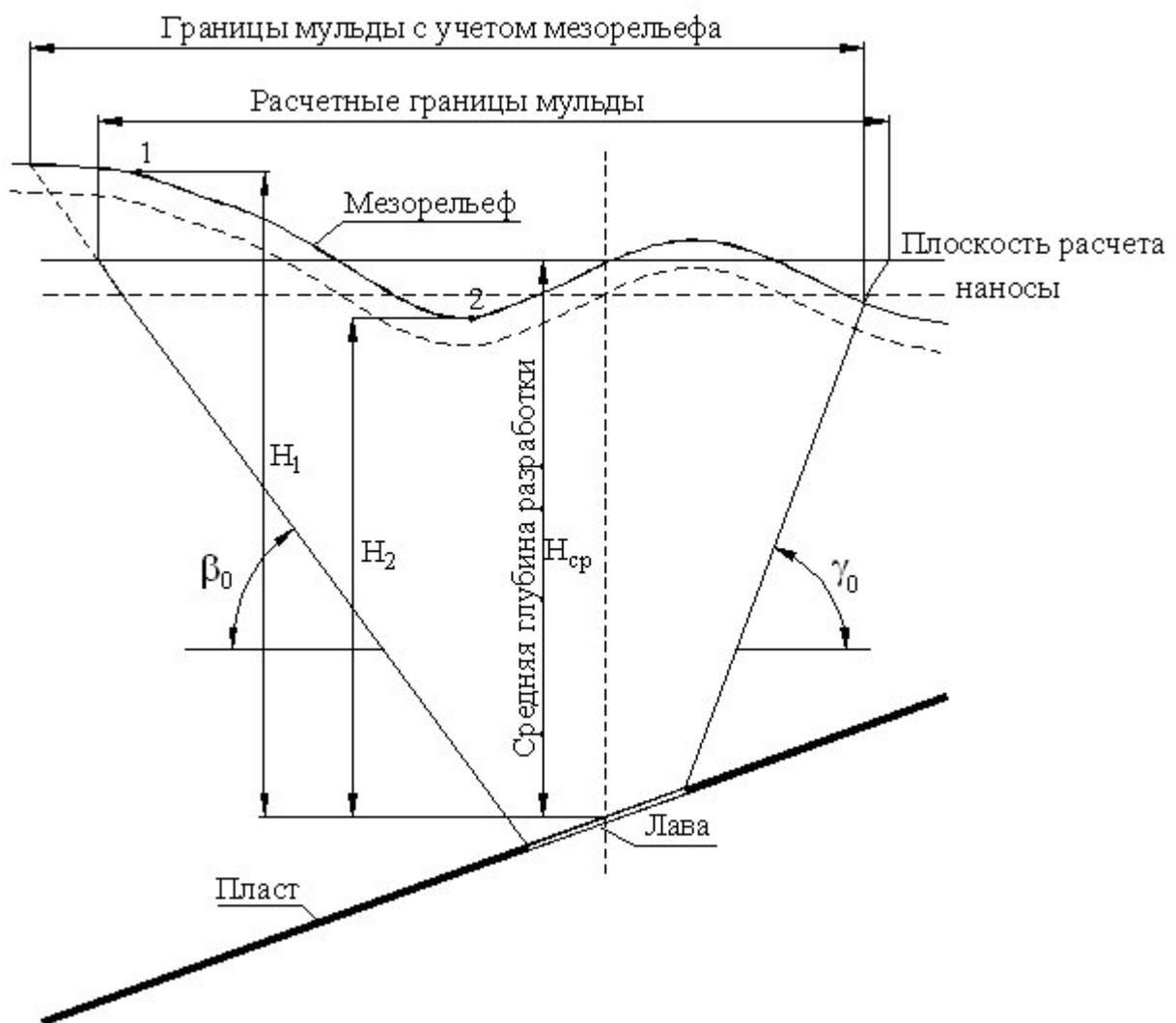


Рис. 1. Схема влияния мезорельефа на точность расчета деформаций земной поверхности

Реальная земная поверхность в зоне подработки отличается от плоскости расчета деформаций, особенно при наличии мезорельефа (рис. 1), что обуславливает появление погрешностей расчета деформаций земной поверхности при использовании существующего алгоритма. Величины этих погрешностей находятся в прямой зависимости от величин отклонения реальной земной поверхности от горизонтальной плоскости расчета. При этом максимальные погрешности расчета деформаций наблюдаются при наличии на обрабатываемой территории достаточно крупных форм рельефа с амплитудой колебаний высот до нескольких десятков метров, т.е. мезорельефа.

Мезорельеф характерен для подавляющего большинства обрабатываемых территорий в Донецком угольном бассейне, в особенности территорий Центрального района Донбасса и Восточного Донбасса. Здесь практически повсеместно наблюдаются холмистый рельеф, повышенная крутизна скатов холмов, разветвленная структура лощин (типа балок).

На территориях некоторых шахтных полей отношение амплитуды колебания высот поверхности мезорельефа к средней глубине разработки достигает 10-15 %, что заметно влияет на точность прогноза деформаций земной поверхности. Расчеты показывают, что для средних глубин разработки от 500 до 1000 м колебания высот мезорельефа в диапазоне 50-100 м приводят к погрешностям расчета оседаний 40-60 мм, наклонов – $0,3-1,1 \times 10^{-3}$, горизонтальных деформаций – $0,3-0,8 \times 10^{-3}$. Для ряда охраняемых объектов погрешности прогноза относительных деформаций (наклонов, кривизны, горизонтальных деформаций), обусловленные влиянием мезорельефа, могут достигать 40-50 % допустимых значений.

С целью учета влияния мезорельефа разработан новый алгоритм расчета деформаций земной поверхности, в котором в отличие от существующей методики расчета используются два новых фактора. Во-первых, при формировании исходных данных для расчета используется цифровая модель рельефа (ЦМР). Для каждой расчетной точки из ЦМР определяется ее высотная отметка.

Во-вторых, взамен постоянного значения средней глубины разработки в расчете деформаций участвует динамическая глу-

бина разработки. Для каждой i -й расчетной точки эта глубина принимается равной

$$H_i^д = Z_i - Z_{ц.л.} = H + \Delta H_i, \quad (1)$$

где Z_i – отметка i -й расчетной точки; $Z_{ц.л.}$ – отметка центра лавы (на почве пласта); H – глубина разработки в центре лавы; ΔH_i – превышение i -й точки над плоскостью расчета, отстоящей от центра лавы на высоту H .

Величина ΔH_i определяется из следующего выражения

$$\Delta H_i = Z_i - (Z_{ц.л.} + H). \quad (2)$$

Естественно, что использование динамической глубины разработки $H_i^д$ вместо средней глубины разработки H вызовет изменение расчетных значений полумульд по падению L_1 , по восстанию L_2 и по простиранию L_3 , а затем и величин деформаций земной поверхности.

2. Функции влияния для деформаций склонов

Известно, что деформации земной поверхности на склонах мезорельефа отличаются от аналогичных деформаций для плоского или равнинного рельефа. В особенности это относится к горизонтальным сдвигам земной поверхности. Дополнительное сдвижение поверхности, обусловленное влиянием склона мезорельефа, назовем дифференциальным сдвижением. Дифференциальное сдвижение включает горизонтальный и вертикальный компоненты, т.е. дифференциальное горизонтальное сдвижение и дифференциальное оседание.

Существует гипотеза, согласно которой дифференциальное сдвижение является совместным результатом сдвижения почвенного слоя и коренных пород. При этом внутренняя деформация в почвенном слое инициируется процессом оседания земной поверхности. Эта гипотеза положена в основу математической модели для прогноза с помощью метода функций влияния сдвижений и деформаций земной поверхности на местности с крутыми откосами [2]. Рассмотрим применение данной математической модели для прогноза деформаций земной поверхности на склонах мезорельефа над прямоугольной очистной выработкой (рис. 2).

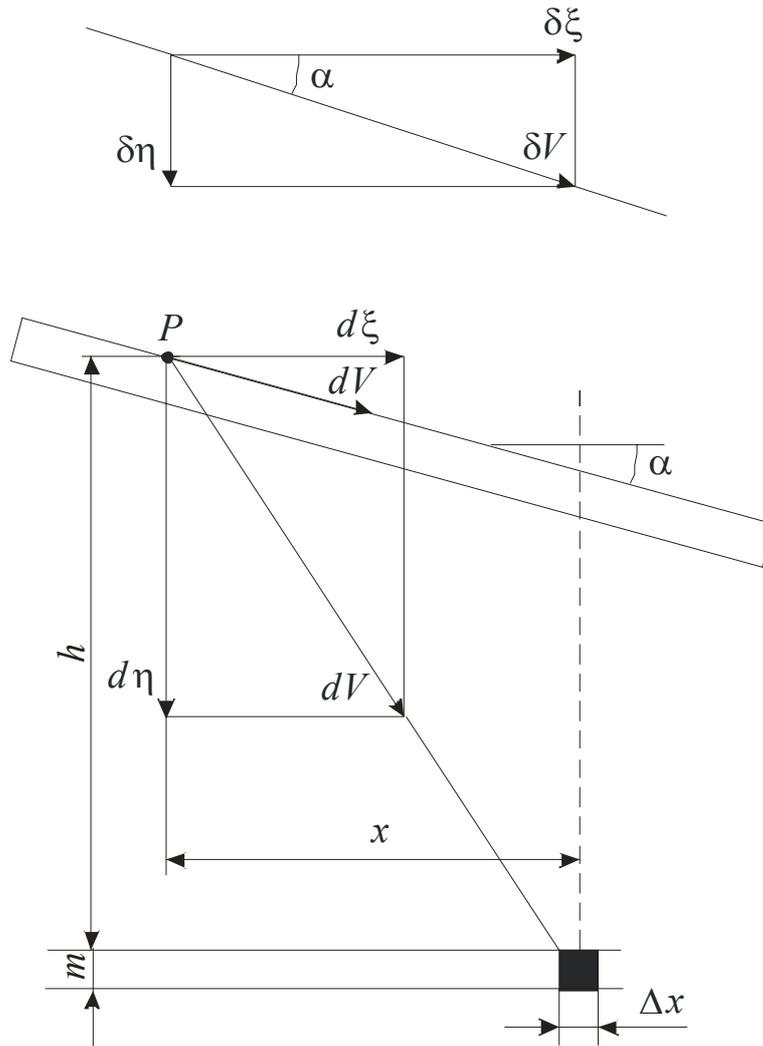


Рис. 2. Схема сдвижения поверхности на склоне мезорельефа

Предположим, что дифференциальное сдвижение δV пропорционально сдвижению поверхности dV по направлению склона. Компонент dV представляет смещение точки поверхности по направлению к центру очень малого элемента (Δx), вызванного выемкой этого элемента из угольного пласта (рис. 2). Величина дифференциального сдвижения δV может быть вычислена по формуле:

$$\delta V = G dV_{\alpha}, \quad (3)$$

где G – коэффициент пропорциональности; dV_{α} – компонент смещения dV по направлению склона с углом падения α , вычисляемый по формуле:

$$dV_{\alpha} = d\eta \cdot \sin \alpha + d\xi \cdot \cos \alpha . \quad (4)$$

Подставляя значение dV_{α} в выражение (3), получим

$$\delta V = G(d\eta \cdot \sin \alpha + d\xi \cdot \cos \alpha) . \quad (5)$$

Вертикальный и горизонтальный компоненты дифференциального смещения δV равны:

$$\left. \begin{aligned} \delta \eta &= \delta V \cdot \sin \alpha = G \sin \alpha (d\eta \cdot \sin \alpha + d\xi \cdot \cos \alpha) \\ \delta \xi &= \delta V \cdot \cos \alpha = G \cos \alpha (d\eta \cdot \sin \alpha + d\xi \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \right\} . \quad (6)$$

Вертикальный и горизонтальный компоненты сдвижения dV (т.е., $d\eta$ и $d\xi$) определяются по теории Кнота [3] и теории фокальной точки [4], соответственно как

$$\left. \begin{aligned} \delta \eta &= \frac{\eta_{\max}}{R} e^{-\pi(x/R)^2} \\ \delta \xi &= 2\pi \frac{x}{h} d\eta \end{aligned} \right\} , \quad (7)$$

где η_{\max} – величина максимального оседания; R – величина полумульды в данном сечении; x – расстояние от точки максимального оседания до рассматриваемой точки поверхности; h – вертикальное расстояние от точки поверхности до пласта.

Вертикальный и горизонтальный компоненты смещения по склону поверхности из-за выемки предельно малого элемента подземного угольного пласта могут быть вычислены по формуле:

$$\left. \begin{aligned} d\eta' &= d\eta + G \left(\sin^2 \alpha + \cos \alpha \sin \alpha \frac{2\pi x}{h} \right) d\eta \\ d\xi' &= \frac{2\pi x}{h} d\eta + G \left(\cos \alpha \sin \alpha + \cos^2 \alpha \frac{2\pi x}{h} \right) d\eta \end{aligned} \right\} . \quad (8)$$

Тогда функции влияния для оседания и горизонтального сдвижения по склону поверхности будут равны:

$$\left. \begin{aligned} f_{\eta}(x) &= \frac{\eta_{\max}}{R} \left(1 + G \sin^2 \alpha + G \cos \alpha \sin \alpha \frac{2\pi x}{h} \right) e^{-\pi(x/R)^2} \\ f_{\xi}(x) &= \frac{\eta_{\max}}{R} \left(\frac{2\pi x}{h} (1 + G \cos^2 \alpha) + G \cos \alpha \sin \alpha \right) e^{-\pi(x/R)^2} \end{aligned} \right\} . \quad (9)$$

3. Сдвигения и деформации в главных сечениях

Конечное оседание η' и горизонтальное сдвигение ξ' по склону поверхности могут быть вычислены интегрированием функций влияния (9) как:

$$\left. \begin{aligned} \eta' &= \eta + G \sin \alpha (\eta \cdot \sin \alpha + \xi \cdot \cos \alpha) \\ \xi' &= \xi + G \cos \alpha (\eta \cdot \sin \alpha + \xi \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

В уравнениях (10) величины η и ξ являются оседанием и горизонтальным сдвижением, ожидаемыми на плоской поверхности при равенстве всех прочих условий. Тогда величины η и ξ могут быть вычислены по действующей методике [1], основанной на методе типовых кривых и предполагающей постоянное значение средней глубины разработки для всех точек местности.

Вторые слагаемые в правой части уравнений (10) представляют собой конечные дифференциальные оседания и горизонтальные сдвигения из-за влияния наклона земной поверхности. Именно они могут использоваться как поправки к значениям оседаний η и горизонтальных сдвижений ξ , вычисленным для плоской поверхности по принятой методике.

Значения наклона i' , кривизны K' и относительных деформаций ε' по склону мезорельефа в любой точке главного сечения могут быть получены соответственно как:

$$\left. \begin{aligned} i' &= i \cdot (1 + G \cdot \sin^2 \alpha) + G \cdot \varepsilon \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ K' &= K \cdot (1 + G \cdot \sin^2 \alpha) + G \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ \varepsilon' &= \varepsilon \cdot (1 + G \cdot \cos^2 \alpha) + G \cdot i \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где i , ε и K – соответственно наклон, горизонтальная деформация и кривизна на плоской поверхности, вычисленные по принятой методике [1].

Значение производной $\frac{d\varepsilon}{dx}$ в выражении (11) может быть найдено путем численного дифференцирования переменной ε по координате x в главном сечении, т.е. по расстоянию рассматриваемой точки от точки максимального оседания.

Формулы (10) и (11) позволяют определить сдвигения и деформации в главных сечениях мульды сдвигения. При этом величины горизонтального сдвигения ξ , наклона i , кривизны K и горизонтальной деформации ε для плоской поверхности берутся равными соответствующим значениям для выбранного главного сечения (вдоль оси x либо вдоль оси y), найденным по принятой методике [1].

4. Расчет сдвижений и деформаций в произвольном направлении

Предположим, что в произвольной точке P , расположенной на склоне мезорельефа, нам известно направление λ , вдоль которого необходимо определить деформации земной поверхности, а также известен угол α падения склона в данной точке. Угол λ измерен против хода часовой стрелки от оси x до данного направления. При этом ось x совпадает с линией простирания пласта, а ось y направлена в сторону восстания пласта.

Угол α является углом падения склона мезорельефа. Составляющие это падение углы, параллельные осям x и y , обозначенные соответственно, как α_x и α_y , будут равны

$$\left. \begin{aligned} \alpha_x &= \arctan(\tan \alpha \cdot \cos \lambda) \\ \alpha_y &= \arctan(\tan \alpha \cdot \sin \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Для прямоугольной подземной выработки конечное оседание $\eta'(x, y)$ в точке поверхности P с координатами x и y может быть вычислено по формуле:

$$\eta'(x, y) = \frac{\eta'_x \eta'_y}{\eta'_{\max}} = C'_x C'_y \eta'_{\max} \quad (13)$$

Величины η'_x и η'_y могут быть вычислены из выражения (10) подстановкой вместо величин η , ξ и α соответствующих значений η_x , ξ_x , α_x и η_y , ξ_y , α_y . Соответственно величины C'_x , C'_y и η'_{\max} вычисляются по формуле:

$$\left. \begin{aligned} C'_x &= \eta'_{x \max} / \eta'_{x \max} \\ C'_y &= \eta'_{y \max} / \eta'_{y \max} \\ \eta'_{\max} &= \sqrt{\eta'_{x \max} \cdot \eta'_{y \max}} \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Величины $\eta'_{x \max}$ и $\eta'_{y \max}$, являющиеся максимальными оседаниями соответственно вдоль главных сечений по осям x и y , вычисляются из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} \eta'_{x \max} &= (1 + G \cdot \sin^2 \alpha_x) \cdot \eta_{\max} \\ \eta'_{y \max} &= (1 + G \cdot \sin^2 \alpha_y) \cdot \eta_{\max} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где η_{\max} – максимальное оседание в мульде сдвижения, найденное по принятой в "Правилах подработки" методике [1].

Горизонтальное сдвижение по склону мезорельефа в заданном направлении λ вычисляется по формуле:

$$\xi'_\lambda = \xi'_x C'_y \cos \lambda + \xi'_y C'_x \sin \lambda, \quad (16)$$

где величины ξ'_x и ξ'_y могут быть вычислены из выражения (10) заменой η , ξ и α значениями η_x , ξ_x , α_x и η_y , ξ_y , α_y соответственно.

Величина наклона по склону мезорельефа в заданном направлении λ вычисляется по формуле:

$$i'_\lambda = i'_x \cdot C'_y \cdot \cos \lambda + i'_y \cdot C'_x \cdot \sin \lambda, \quad (17)$$

где величины наклонов i'_x и i'_y соответственно по осям x и y находятся из выражений:

$$\left. \begin{aligned} i'_x &= i_x \cdot (1 + G \cdot \sin^2 \alpha_x) + G \cdot \varepsilon_x \cdot \cos \alpha_x \cdot \sin \alpha_x \\ i'_y &= i_y \cdot (1 + G \cdot \sin^2 \alpha_y) + G \cdot \varepsilon_y \cdot \cos \alpha_y \cdot \sin \alpha_y \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Величина относительной деформации по склону поверхности в заданном направлении λ может быть найдена по формуле:

$$\varepsilon'_\lambda = \varepsilon'_x \cdot C'_y \cdot \cos^2 \lambda + \varepsilon'_y \cdot C'_x \cdot \sin^2 \lambda + \frac{\xi'_x \cdot i'_y + \xi'_y \cdot i'_x}{\eta'_{\max}} \cdot \cos \lambda \cdot \sin \lambda, \quad (19)$$

где величины деформаций ε'_x и ε'_y соответственно по осям x и y находятся из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon'_x &= \varepsilon_x \cdot (1 + G \cdot \cos^2 \alpha_x) + G \cdot i_x \cdot \cos \alpha_x \cdot \sin \alpha_x \\ \varepsilon'_y &= \varepsilon_y \cdot (1 + G \cdot \cos^2 \alpha_y) + G \cdot i_y \cdot \cos \alpha_y \cdot \sin \alpha_y \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

Величина кривизны по склону поверхности в заданном направлении λ равна

$$K'_\lambda = K'_x \cdot C'_y \cdot \cos^2 \lambda + K'_y \cdot C'_x \cdot \sin^2 \lambda + \frac{2 \cdot i'_x \cdot i'_y}{\eta'_{\max}} \cdot \cos \lambda \cdot \sin \lambda, \quad (21)$$

где величины кривизны K'_x и K'_y соответственно по осям x и y находятся из выражений:

$$\left\{ \begin{aligned} K'_x &= K_x \cdot (1 + G \cdot \sin^2 \alpha_x + G \cdot \frac{d\varepsilon_x}{dx} \cdot \cos \alpha_x \cdot \sin \alpha_x) \\ K'_y &= K_y \cdot (1 + G \cdot \sin^2 \alpha_y + G \cdot \frac{d\varepsilon_y}{dy} \cdot \cos \alpha_y \cdot \sin \alpha_y) \end{aligned} \right. . \quad (22)$$

Величины производных $\frac{d\varepsilon_x}{dx}$ и $\frac{d\varepsilon_y}{dy}$ находятся путем численного дифференцирования переменных ε_x и ε_y соответственно по координатам x и y .

5. Коэффициент пропорциональности G

В модель прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности на склонах мезорельефа введен коэффициент пропорциональности G . Для его определения в работе [3] предложена диаграмма, основанная на эмпирических данных (рис. 3).

Предполагается, что этот коэффициент является функцией угла естественного откоса, механических свойств и мощности почвенного слоя, растительности на поверхности и т.д.

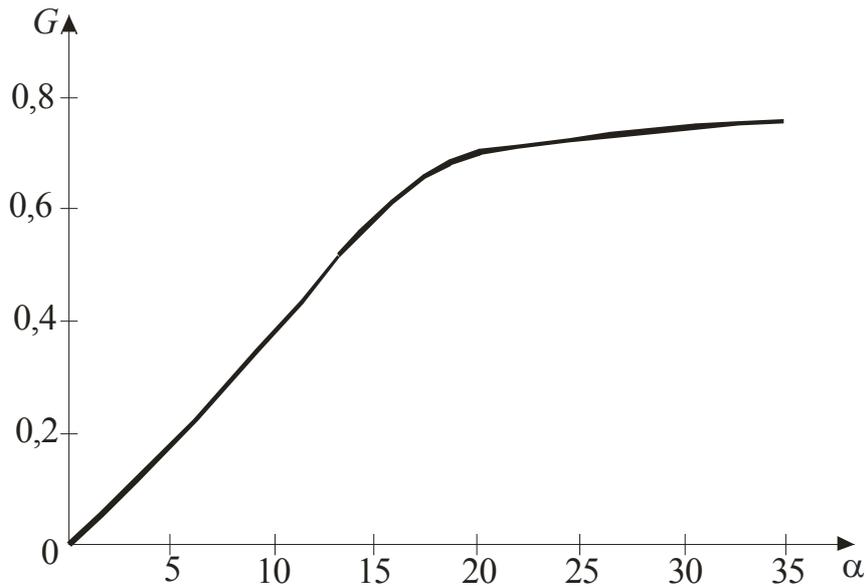


Рис. 3. Диаграмма для определения коэффициента пропорциональности G

ВЫВОДЫ

1. Расчет сдвижений и деформаций земной поверхности от влияния подземных горных разработок в существующей методике осуществляется для постоянного значения средней глубины разработки, т.е. для некоторой усредненной горизонтальной плоскости. Влияние мезорельефа местности при этом не учитывается.

2. В Донецком угольном бассейне подавляющее большинство подрабатываемых территорий характеризуется мезорельефом. Во многих случаях перепады высот в пределах шахтного поля достигают 10-15 % от средней глубины разработки, что оказывает заметное влияние на точность прогноза деформаций земной поверхности. Так, погрешности определения наклонов и горизонтальных деформаций могут достигать 40-50 % допустимых значений для ряда объектов на подрабатываемой территории.

3. На основе известной гипотезы о взаимосвязи сдвижения почвенного слоя и коренных пород вследствие протекания процесса сдвижения земной поверхности использована математическая модель прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности на местности с крутыми склонами, т.е. на склонах мезо-

рельефа. Данная модель основана на использовании метода функций влияния сдвижений и деформаций земной поверхности.

4. Определены функции влияния для оседания и горизонтального сдвижения на склонах мезорельефа, основанные на теории Кнота, теории фокальной точки, а также на методе единичных кривых, принятом в действующей методике прогноза [1].

5. Предложен алгоритм вычисления сдвижений и деформаций на склонах мезорельефа, как в главных сечениях мульды сдвижения, так и в произвольном направлении. Исходными данными для расчета служат цифровая модель рельефа, а также значения сдвижений и деформаций земной поверхности, найденные по принятой методике [1].

6. Для реализации предложенного алгоритма прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности с учетом влияния мезорельефа разработано специальное программное обеспечение.

СПИСОК ССЫЛОК

1. ГСТУ 101.00159226.001 – 2003. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. На зміну «Правил охорони...» (М.: Недра, 1981. – 288 с.); Введ. 01.01.2004.– К., 2004. – 128 с.
2. Peng, S.S. Surface Subsidence Engineering [Text] / Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. – Ann Arbor: MI, 1992. – 161 p.
3. Knothe, S. Observations of Surface Movements Under Influence of Mining and Their Theoretical Interpretation [Text] / S. Knothe// Proceedings European Congress Ground Movement. – Leeds, UK, 1957. – P. 210-218
4. Кратч, Г. Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений [Текст] / Г. Кратч; Пер. с нем./ под ред. Р.А. Муллера и И.А. Петухова. – М.: Недра, 1978. – 494 с.