

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧЕК МАКСИМАЛЬНЫХ НАКЛОНОВ В МУЛЬДЕ СДВИЖЕНИЯ**

*На основе анализа экспериментальных данных установлены новые зависимости, позволяющие прогнозировать локализацию точек максимальных наклонов в подрабатываемом массиве горных пород и на земной поверхности. Проведена оценка точности предлагаемого метода путем сравнения прогнозных и фактических данных, которая подтвердила возможность его использования на практике.*

Мульда сдвижения, образующаяся на земной поверхности в результате влияния очистной выработки, в своих двух главных вертикальных сечениях имеет ряд характерных точек, определяющих ее размеры, форму и локализацию. В методиках расчета, используемых на протяжении более полувека в отечественной практике [1-4], в качестве исходных для определения местоположения и размеров мульды используются граничные точки мульды сдвижения и точка максимального оседания.

В современных условиях ведения очистных работ при подземной разработке угольных пластов применяемые ранее методы прогноза сдвижения массива горных пород и земной поверхности теряют точность. В частности, это относится к определению границ мульды сдвижения с помощью установленных критических значений деформаций наклонов и растяжений земной поверхности, что регламентировано действующим нормативным документом [4]. При увеличении глубины разработки такой подход становится некорректным, поскольку сопоставимые с критическими значения деформаций проявляются на значительной части подрабатываемой территории, вследствие чего определение положения ее границ путем инструментальных наблюдений не представляется возможным. В результате этого становится проблематичным точный прогноз абсолютно всех параметров мульды сдвижения по причине возникающей неопределенности положения ее граничных точек.

Одним из возможных способов решения данной проблемы может быть отказ от использования граничных точек в качестве опорных для построения мульды сдвижения, и замена их на другие характерные точки, определение которых на земной поверхности даже в условиях больших глубин разработки не столь затруднительно. В разные годы исследователями предлагались в этом качестве точки максимальной кривизны [5], максимальных горизонтальных деформаций [6,7], перегибов крыльев мульды и максимальных наклонов [8,9].

Из этого ряда наиболее приемлемыми для определения положения мульды сдвижения по ряду причин представляются точки максимального наклона, поскольку они обладают целым рядом преимуществ по сравнению с граничными точками. Во-первых, положение точек с максимальными наклонами на подрабатываемой территории определяется более точно с помощью инструментальных наблюдений вследствие того, что сдвижения и деформации земной поверхности в них имеют значительно большие значения, чем в краевых частях мульды, что в конечном итоге уменьшает долю относительных погрешностей измерений. Во-вторых, угловая ошибка при определении положения такой точки на земной поверхности относительно границы очистной выработки вызывает меньшую линейную ошибку, поскольку прямая, соединяющая границу лавы с точкой максимального наклона, как правило, круче, чем прямая, соединяющая границу лавы с граничной точкой мульды. В-третьих, положение точки макси-

мальных наклонов в пространстве практически не изменяется в процессе развития сдвижения массива над очистной выработкой во всех его стадиях при других равных условиях, и поэтому ее прогноз будет точным в любой стадии процесса. Кроме того, точное прогнозирование локализации максимальных наклонов при ведении очистных работ облегчает задачу защиты подрабатываемых объектов, для которых наклоны являются наиболее опасным видом деформаций, как на земной поверхности (высотные строения, дымовые трубы, башенные сооружения и др.), так и в породном массиве (технические скважины).

Для использования точек с максимальными значениями наклонов  $i_m$  при расчете параметров мульды сдвижения необходимо уметь прогнозировать их локализацию в подрабатываемом массиве горных пород и на земной поверхности. Положение такой точки может быть определено с помощью углов максимальных наклонов  $\sigma$ , 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 различных горизонтах подрабатываемого массива, включая земную поверхность. Условимся в дальнейшем обозначать такие углы в полумульде по падению пласта  $\sigma_1$ , по восстанию –  $\sigma_2$ , по простиранию –  $\sigma_3$ .

На рисунках 1, 2 показаны результаты некоторых натуральных экспериментов, полученных на комплексных наблюдательных станциях, из которых можно видеть, как меняется положение точки с  $i_m$  в подрабатываемом массиве горных пород.

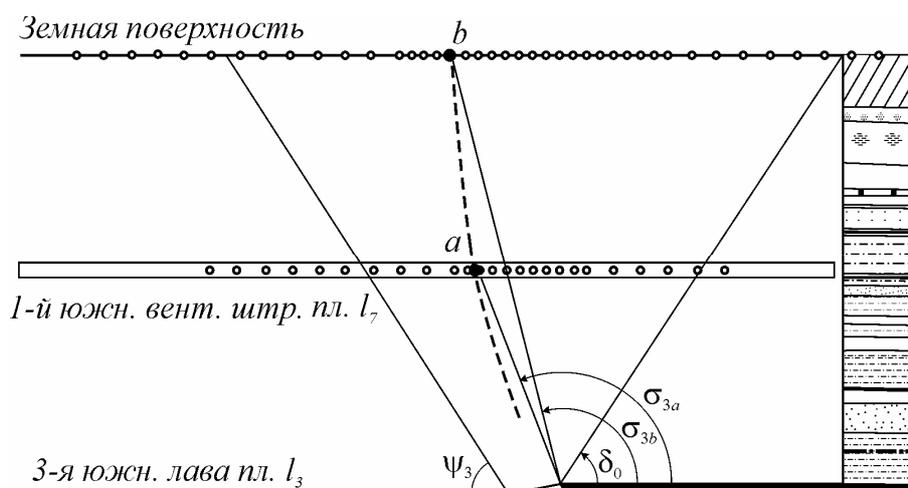


Рис. 1. Шахта "Селидовская", "Красноармейскуголь" [11]

Предварительный анализ позволяет заключить, что линия, соединяющая между собой точки с  $i_m$  в подрабатываемом массиве горных пород, представляет собой кривую, выпуклую в сторону выработанного пространства, форма и направление которой изменяется как с удалением от пласта к земной поверхности, так и с увеличением угла падения пласта.

Ранее уже предпринимались попытки определения местоположения на земной поверхности точки с  $i_m$  в аналитико-экспериментальном методе расчета сдвижений и деформаций земной поверхности [9, 10], который, к сожалению, не получил широкого практического применения. В результате проведенных исследований были установлены зависимости угла  $\sigma$  от двух влияющих факторов – угла падения пласта и коэффициента подработанности земной поверхности:

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

где  $\alpha$  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.

Сравнение фактических и рассчитанных по формуле (1) углов  $\sigma$  показало, что в современных условиях разработки угольных пластов точность прогноза по предложенному способу часто страдает погрешностями. В одних случаях их источником является влияние неучтенных факторов, в других – некорректный учет принимаемых во внимание влияющих факторов.

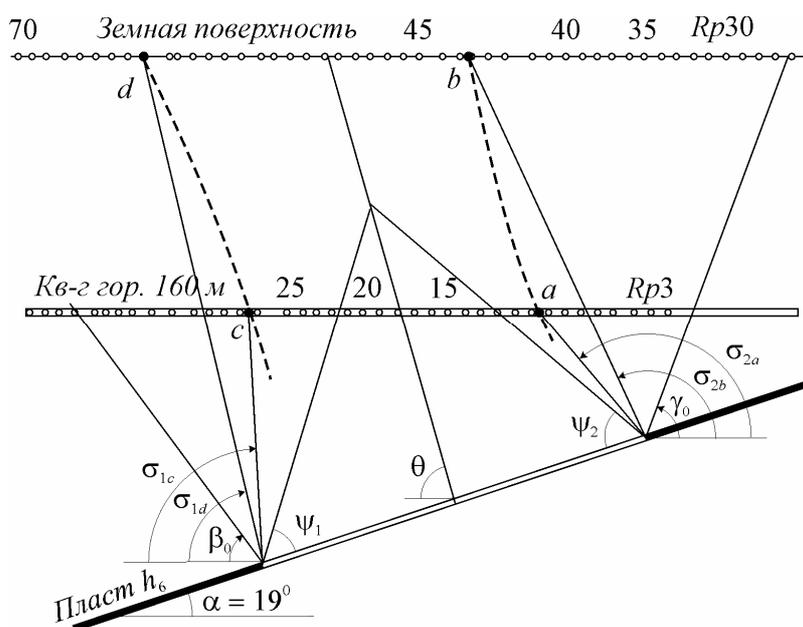


Рис. 2. Шахта "Заря", "Торезантрацит"

Так, например, в данной методике не учитывается мощность наносов, хотя влияние этого фактора очевидно. Известно, что процессы сдвижения в коренных слоистых породах и в наносах носят разный характер. В связи с тем, что несущая способность наносов при свободном провисании весьма незначительна, особенно по сравнению с несущей способностью коренных пород, их вертикальное сдвижение в форме прогиба происходит одновременно с вертикальным сдвижением верхней границы коренных пород, контактирующей с ними [1]. Вследствие этого верхняя граница наносов (земная поверхность) претерпевает те же вертикальные сдвижения (а, значит, и деформации наклонов), что и нижняя, контактирующая с коренными породами, что доказано экспериментально. Этот принцип заложен в методиках расчета вертикальных сдвижений и деформаций, рекомендованных действующими нормативными документами [4, 13].

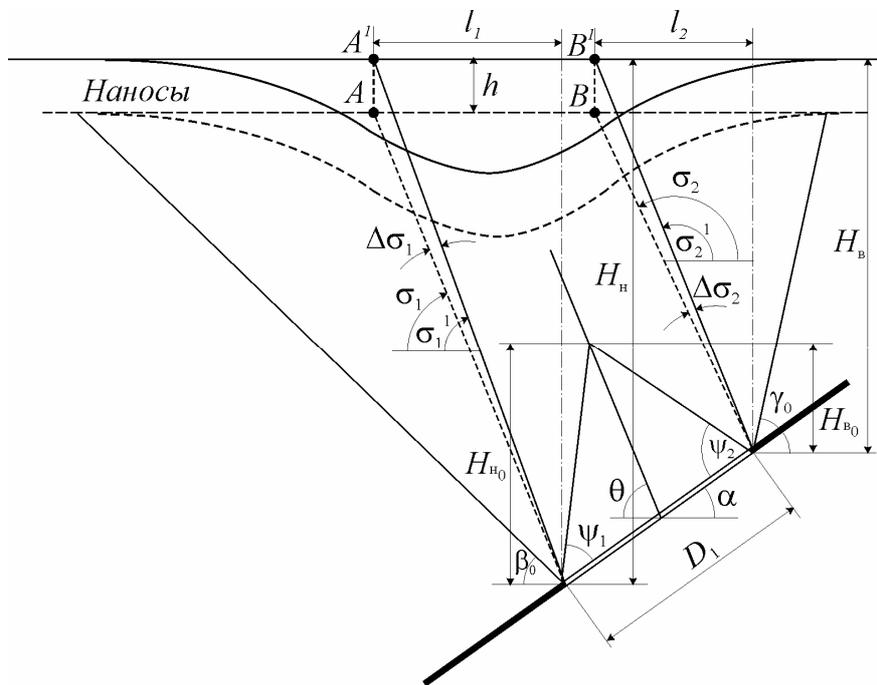
Следовательно, определение значений углов  $\sigma_1'$  и  $\sigma_2'$  по точкам  $A'$  и  $B'$ , в которых экспериментально фиксируют максимальные наклоны земной поверхности, происходит с некоторыми ошибками  $\Delta\sigma_1$  и  $\Delta\sigma_2$  (рис. 3), поскольку в коренных породах углы максимальных наклонов должны определяться по точкам  $A$  и  $B$ , расположенным на контакте коренных пород с наносами:

$$\sigma_{1(2)} = \text{arcctg}\left(\frac{H_{н(в)}}{H_{н(в)} - h} \cdot \text{ctg}\sigma_{1(2)}'\right), \quad (2)$$

где  $H_{н(в)}$  – глубина залегания нижней (верхней) границы очистной выработки, м;  
 $h$  – мощность наносов, м.

Кроме того, в учитываемый фактор подработанности земной поверхности, определяемый в формуле (1) отношением  $D/H$ , входит средняя глубина разработки, которая, наряду с вертикальной мощностью подрабатываемой пачки коренных пород, включает в себя ту же мощность наносов  $h$ . Однако, принимая во внимание приведенные выше рассуждения о различиях в характере развития сдвижения, это не является логичным.

Ниже приведены результаты исследования, проведенного нами с целью определения степени соответствия зависимости (1) современным условиям разработки угольных месторождений и установлению дополнительных влияющих факторов.



**Рис. 3.** Схема к определению локализации точек максимальных наклонов

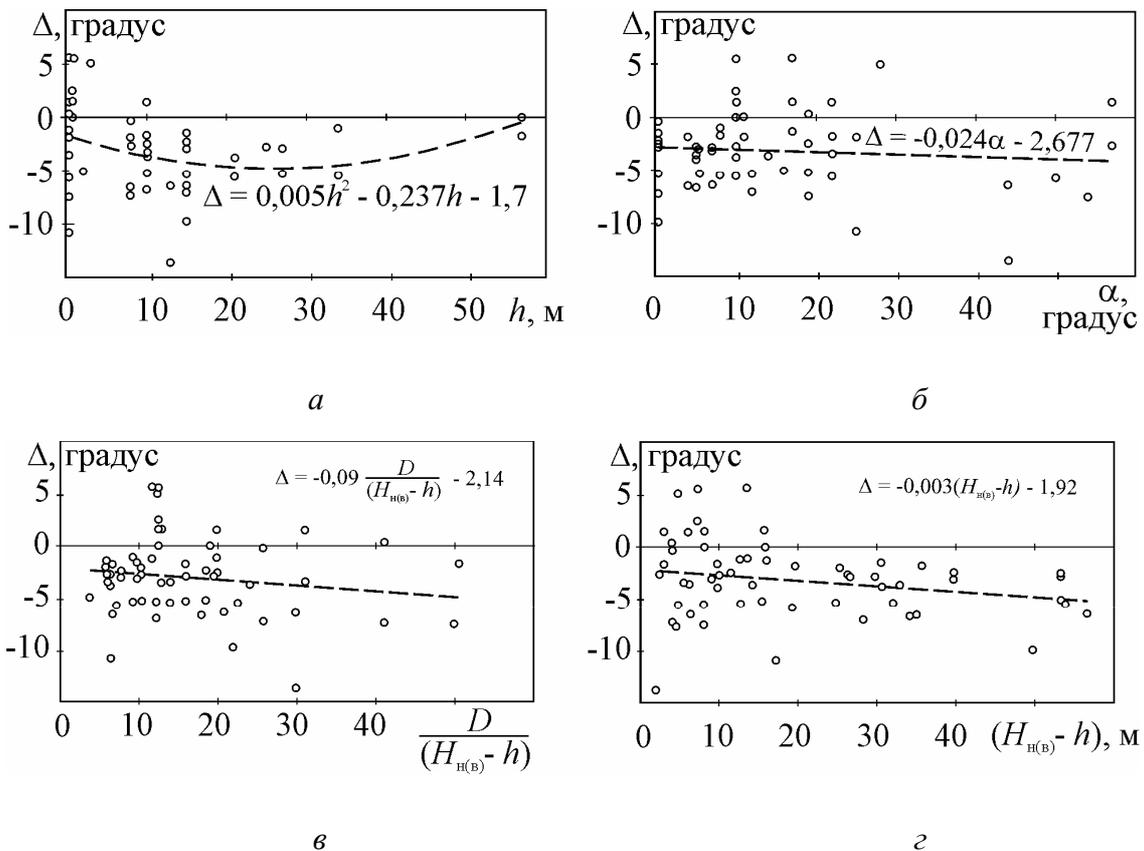
Для анализа нами были привлечены результаты экспериментальных исследований параметров процесса сдвижения земной поверхности и массива горных пород по 34 профильным линиям реперов 26 наблюдательных станций, оборудованных как на земной поверхности, так и в горных выработках, где в 37 случаях подработки было зафиксировано 59 точек с максимальными величинами наклонов (фонды УкрНИМИ). Экспериментальные данные были получены в достаточно широком спектре условий, чтобы полученные результаты можно было считать представительными:

- угол падения пласта – от 0 до  $57^{\circ}$ ;
- средняя глубина разработки – от 42 до 1090 м;
- мощность наносов – от 0 до 57 м;
- размер выработанного пространства в главном сечении мульды сдвижения – от 68 до 1100 м.

При анализе использовался метод исследования остатков  $\Delta$  [12], представляющих собой разности между наблюдаемой величиной (фактический угол максимальных наклонов, измеренный по результатам инструментальных наблюдений) и соответствующей

прогнозной величиной, получаемой для данных условий по формуле (1). При этом в качестве независимого аргумента принимался параметр, исследуемый на предмет наличия влияния описываемого им фактора на величину угла максимальных наклонов.

Так, на рис. 4 а показан график распределения остатков по неучтенному фактору мощности наносов  $h$ , а на рис. 4 б – по учитываемому фактору угла падения пласта  $\alpha$ . Очевидно, что в каждом из этих случаев распределение остатков имеет некоторый тренд при изменении величины исследуемого фактора, а, следовательно, отличается от нормального закона распределения относительно нулевой ординаты. В рассматриваемом случае это свидетельствует о том, что принятая модель не учитывает некоего нелинейного влияния величины  $h$ , поскольку данный тренд имеет вид квадратичной функции, а учет фактора  $\alpha$  происходит с систематической ошибкой, на что указывает смещение центра группирования остатков в отрицательную область графика.



**Рис. 4.** Графики распределения остатков по влияющим факторам

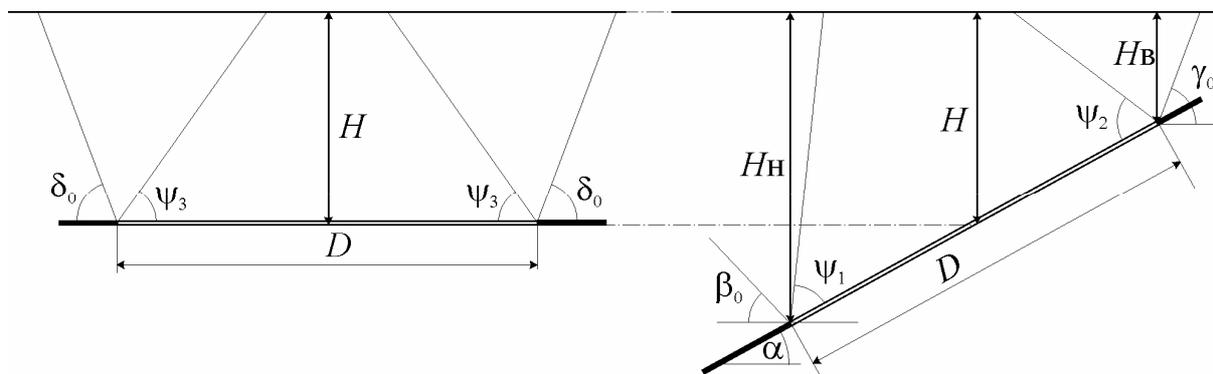
В процессе анализа был выявлен еще один неучтенный влияющий фактор – глубина залегания рассматриваемой границы очистной выработки, над которой зафиксирован максимальный наклон.

Обратим внимание на то, что формула (1) абсолютно симметрична для полюдьд по падению и по восстанию пласта. В то же время многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что с увеличением угла падения пласта возрастает асимметрия в распределении сдвижений и деформаций массива горных пород и земной поверхности при подработке, чего структура формулы (1) не учитывает ни одним из своих параметров.

Так, фактор средней глубины разработки  $H$  учитывается в формуле (1) в "связанном" виде – лишь в отношении к размеру очистной выработки  $D$ . Такая форма пред-

ставления данного фактора может корректно отражать удаленность исследуемой области подрабатываемого массива от границ зоны полных сдвижений только в относительном формате и только при горизонтальном залегании пласта. В то же время известно, что при изменении глубины разработки величина и характер деформаций изменяется, причем это особенно заметно с увеличением угла падения породных слоев [14].

Объясняется это тем, что при распространении процесса сдвижения вверх от очистной выработки к земной поверхности при наклонном залегании породных слоев опорные участки со сторон падения и восстания пласта неодинаково отодвигаются от границ очистной выработки вглубь массива. Непосредственно над очистной выработкой направление сдвижения толщи определяется прогибом пород по нормали к напластованию, а по мере приближения к земной поверхности начинают преобладать вертикальные сдвижения, определяемые вертикально направленной силой тяжести. Вследствие этого увеличивается асимметрия мульды сдвижения со смещением точек максимальных сдвижений и деформаций от нормали к напластованию в сторону восстания слоев. Очевидно, что величина такой асимметрии в рассматриваемом вертикальном сечении должна зависеть не только от угла падения слоев, но и от глубины, на которой находится та или иная граница очистной выработки независимо от ее размеров. На схеме (рис. 5) приведены два варианта подработки земной поверхности с одинаковыми параметрами – средней глубиной разработки  $H$ , и размерами выработанного пространства  $D$ . Из их сравнения видно, что, если в первом случае отношение  $D/H$ , одинаковое для обоих вариантов, в равной степени характеризует условия подработанного массива над каждой из границ выработки, то во втором наблюдается явное отличие в условиях подработки над нижней границей на глубине  $H_n$  и над верхней на глубине  $H_b$ .



**Рис. 5.** Варианты подработки земной поверхности с одинаковым отношением  $D/H$

Поэтому логично предположить, что при негоризонтальном залегании пласта местоположение точек максимального наклона в каждой полумульде сдвижения должно характеризоваться не средней глубиной разработки  $H$ , а глубиной залегания соответствующей границы выработанного пространства  $H_n$  или  $H_b$ . Причем, принимая во внимание приведенные выше рассуждения об отличии характера развития сдвижения в наносах, очевидно, что этот фактор должен учитываться с поправкой на их мощность  $h$ .

На рис. 4 *в, г* показаны графики распределения остатков зависимости (1) по факторам  $(H_{n(b)} - h)$  и  $D/(H_{n(b)} - h)$ , подтверждающие, что их влияние данной зависимостью либо не учитывается, либо учитывается некорректно.

Таким образом, проведенный анализ зависимости (1) позволил прийти к следующим основным выводам:

1) принятые во внимание влияющие на местоположение точки максимального наклона факторы  $\alpha$  и  $D/H$  учитываются с некоторыми погрешностями;

2) зависимость (1) не учитывает такие влияющие факторы, как глубина залегания границы очистной выработки на вертикальном сечении вкрест простирания пласта при негоризонтальном его залегании, мощность наносов и степень метаморфизма подрабатываемого породного массива.

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных нами получен вид и параметры усовершенствованной зависимости (1) для определения углов максимальных наклонов  $\sigma$  (в градусах) в подрабатываемом массиве горных пород, в которой учтены новые влияющие факторы:

$$\sigma_{1(2)} = a_1 \left[ a_2 \mp a_3 \alpha + a_4 \left( \frac{D}{H_{B(H)} - h} \right)^{a_5} + a_6 (H_{B(H)} - h)^{a_7} \right], \quad (3)$$

где  $D$  – размер очистной выработки в рассматриваемом главном сечении мульды сдвижения, м;  $\alpha$  – угол падения пласта в данном вертикальном сечении, градус;  $H_{B(H)}$  – глубина залегания верхней (нижней) границы очистной выработки, м;  $h$  – мощность наносов, м;  $a_1 - a_7$  – эмпирические коэффициенты:  $a_1 = 1,00$  для каменноугольных районов Донбасса и  $1,03$  – для антрацитовых;  $a_2 = 92,6^0$ ;  $a_3 = 0,91$ ;  $a_4 = 6,15^0$ ;  $a_5 = 1,21$ ;  $a_6 = -0,314^0$ ;  $a_7 = 0,402$ .

Знак "–" в формуле (3) относится к полумульде по падению пласта, знак "+" – к полумульде по восстанию.

Анализ точности прогноза местоположения в массиве точки максимального наклона с помощью зависимости (3) показал, что стандартное отклонение рассчитанных по ней углов  $\sigma$  составляет  $3,0^0$ .

Следует отметить, что описанный подход к определению локализации точек максимальных наклонов более удобен при прогнозе сдвижений массива горных пород, в то время как при расчете мульды сдвижения на земной поверхности удобнее иметь дело не с угловыми, а с линейными параметрами. Из схемы на рис. 3 видно, что при определении местоположения точек максимальных наклонов со стороны падения пласта  $A'$  и со стороны восстания  $B'$  с помощью линейных параметров соответственно  $l_1$  и  $l_2$  (горизонтальных расстояний, измеряемых от проекции соответствующей границы очистной выработки на земную поверхность), нет необходимости вносить поправку на мощность наносов. Кроме того, одна и та же угловая погрешность при прогнозе углов максимальных наклонов  $\sigma$  при увеличении глубины разработки будет давать все большую линейную погрешность в определении местоположения точки максимального наклона на земной поверхности.

Для определения влияющих факторов, а также вида и параметров зависимости от них критериальной величины  $l_{1(2)}$  (далее – линейный параметр локализации точки максимального наклона на земной поверхности), нами были использованы результаты описанного выше экспериментального материала. В процессе анализа было установлено, что в отличие от полученной выше зависимости, в данном случае набор влияющих факторов претерпел некоторые изменения. В частности, установлено заметное уменьшение влияния отношения  $D/(H_{B(H)} - h)$ , характеризующего степень подработанности рассматриваемого горизонтального сечения массива. Вместо него нами был использован параметр, определяющий глубину залегания нижней или верхней границы выработанного пространства под контактом коренных пород с наносами ( $H_{B(H)} - h$ ) относительно высоты зоны полных сдвижений  $H_{H0}$  ( $H_{B0}$ ) над данной границей (см. рис. 3):

$$\frac{H_H - h}{H_{H0}} = \frac{(H_H - h) \cdot \sin(\psi_1 + \psi_2)}{D_1 \cdot \sin \psi_2 \cdot \sin(\psi_1 + \alpha)},$$

$$\frac{H_B - h}{H_{B0}} = \frac{(H_B - h) \cdot \sin(\psi_1 + \psi_2)}{D_1 \cdot \sin \psi_1 \cdot \sin(\psi_1 - \alpha)},$$
(4)

где  $D_1$  – размер очистной выработки на разрезе вкрест простирания, м.

При горизонтальном залегании пласта или на разрезе по простиранию величины  $H_{H0}$  и  $H_{B0}$  в выражении (4) становятся равными между собой, приобретая вид:

$$H_{H0} = H_{B0} = H_0 = D_2 \frac{\sin^2 \psi_3}{\sin(2\psi_3)},$$
(5)

где  $D_2$  – размер очистной выработки на разрезе по простиранию, м;  $\psi_3$  – угол полных сдвижений по линии простирания пласта, градус; (при  $\alpha = 0$  выполняется условие  $\psi_3 = \psi_1 = \psi_2$ ).

Как оказалось, этот параметр достаточно объективно описывает относительную удаленность земной поверхности от рассматриваемой границы очистной выработки.

Условимся, что величина линейного параметра локализации точки максимального наклона  $l_{1(2)}$  отрицательна, если она откладывается от проекции на земную поверхность границы очистной выработки в сторону центра данной выработки, и положительна, если в противоположную сторону. Регрессионный анализ позволил установить вид и параметры зависимости этой величины:

$$l_{1(2)} = b_1 \left[ b_2 + b_3 (H_{H(B)} - h) \operatorname{tg} \alpha + b_4 (H_{H(B)} - h) + b_5 \left( \frac{H_{H(B)} - h}{H_{H(B)0}} \right)^{b_6} \right],$$
(6)

где  $\alpha$  – угол падения пласта в данном вертикальном сечении, градус;  $H_{H(B)}$  – глубина залегания верхней (нижней) границы очистной выработки, м;  $h$  – мощность наносов, м;  $b_1 - b_6$  – эмпирические коэффициенты:  $b_1 = 1,7$  для каменноугольных районов Донбасса и  $2,0$  – для антрацитовых;  $b_2 = -19,7$  м;  $b_3 = 0,52$  для полумульды по падению пласта и  $-0,45$  – по восстанию, м;  $b_4 = -0,014$ ;  $b_5 = 3,47$  м;  $b_6 = 1,37$ .

Анализ точности прогноза местоположения в массиве точки максимального наклона с помощью зависимости (6) показал, что стандартное отклонение рассчитанных по ней величин  $l_{1(2)}$  составляет 15,8 м. Это меньше 20-ти метрового интервала, регламентируемого для рабочих реперов профильных линий типовых наблюдательных станций на земной поверхности для глубин разработки более 300 м [15], что говорит о достаточной точности предлагаемого метода прогноза. С увеличением глубины разработки относительная линейная погрешность  $\Delta/H_{H(B)}$  при определении величины  $l_{1(2)}$  уменьшается, и уже после 500 м практически не превышает 3-5 %, что вполне приемлемо для практических целей.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено следующее.

При увеличении глубины подземной разработки пластовых месторождений угля применяемые методы прогноза локализации мульды сдвижения в массиве горных пород и на земной поверхности теряют точность, что вызвано трудностью определения граничных точек мульды сдвижения. Более перспективным является метод определения размеров и местоположения мульды сдвижения с помощью точек максимальных наклонов.

Предложенный ранее способ определения местоположения точек максимальных наклонов [9, 10] при современных больших глубинах разработки часто страдает погрешностями по причине того, что в нем не учитывается ряд важных влияющих факторов.

В результате анализа экспериментальных данных установлены новые зависимости угла максимальных наклонов и линейного параметра локализации точки максимального наклона на земной поверхности от совместного влияния комплекса факторов. Основными из них являются: угол падения пласта; степень подработанности горизонтального сечения массива, для которого проводится прогноз; мощность наносов; глубина залегания границ очистной выработки; степень метаморфизма горных пород подрабатываемого массива.

Проведена оценка точности установленных зависимостей путем сравнения прогнозных и фактических данных, которая подтвердила возможность их использования на практике.

### Библиографический список

1. **Сдвигение горных пород** и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР / ВНИМИ. – М.: Углетехиздат, 1958. – 250 с.
2. **Правила охраны** сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в Донецком угольном бассейне/ Минуглепром СССР.- М., 1972. – 130 с.
3. **Правила охраны** сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / Министерство угольной промышленности СССР. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
4. **Правила підробки** будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. Галузевий стандарт України: ГСТУ 101.00159226.001-2003: Затв. Мінпаливенерго України 28.11.2003. – Донецьк: УкрНДМІ, 2003. – 144 с.
5. **Акимов А.Г.** Определение размеров краевой части мульды сдвижения // Сдвигение горных пород. – Л.: ВНИМИ. – 1975. – Вып. 96. – С. 28-32.
6. **Варлашкин В.М., Иофис М.А.** Еще раз о рациональных способах подготовки и системах разработки сближенных пластов // Уголь. – 1964. – № 2. – С. 62-65.
7. **Кулибаба С.Б.** О границах мульды сдвижения // Сдвигение земной поверхности и устойчивость откосов. – Л.: ВНИМИ. – 1980. – С. 57 - 60.
8. **Фисенко Г.Л.** Некоторые вопросы сдвижения горных пород при разработке глубоких горизонтов угольных шахт // Исследование проявлений горного давления на глубоких горизонтах шахт. – Л.: ВНИМИ. – 1971. – С. 337-346.
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.
11. Охрана подрабатываемых подготовительных выработок / **Н.П. Бажин, О.И. Мельников, В.С. Пиховкин, В.В. Райский.** – М.: Недра, 1978. – 253 с.
12. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
13. **Правила охраны** сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – С.-Петербург: ВНИМИ, 1998. – 291 с.
14. **Кулибаба С.Б.** Распределение максимальных оседаний в подрабатываемом породном массиве // Уголь Украины. – 2000. – № 12. – С. 42 - 44.
15. **Инструкция** по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях: Утв. Минуглепром СССР 30.12.87. – М.: Недра, 1989. – 96 с.

© Кулибаба С.Б., Рожко М.Д., Хохлов Б.В., 2009