

*Чепурная Л.А.,
Филатьев М.В.,
д.т.н. Антощенко Н.И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

О ПАРАМЕТРАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

На підставі аналізу експериментальних даних і розрахункових значень осідання земної поверхні для характерних розмірів виїмкових ділянок встановлено зміну кінцевого осідання земної поверхні при розвитку очисних робіт як в межах однієї виїмкової ділянки, так і всього шахтного поля. За результатами проведеного аналізу визначена область застосування відомої математичної моделі, що описує зсування підроблених порід і земної поверхні у часі.

Ключові слова: *вироблений простір, осідання, мульда зрушення, математична модель.*

На основании анализа экспериментальных данных и расчетных значений оседания земной поверхности для характерных размеров выемочных участков установлено изменение конечного оседания земной поверхности при развитии очистных работ как в пределах одного выемочного участка, так и всего шахтного поля. По результатам проведенного анализа определена область применения известной математической модели, описывающей сдвигение подработанных пород и земной поверхности во времени.

Ключевые слова: *выработанное пространство, оседание, мульда сдвижения, математическая модель.*

Решение многих актуальных задач горного производства связано с процессами сдвижения подработанных пород и земной поверхности. К ним относятся выбор места расположения и несущей способности крепи подготовительных выработок, обоснование способа управления кровлей в очистных забоях, прогноз газовыделения из выработанных пространств и выбор схем проветривания шахт и выемочных участков, защита и безопасная подработка водных и других объектов на земной поверхности.

Параметры процессов сдвижения пород и земной поверхности существенно отличаются между собой на разных стадиях их протекания после подработки, что необходимо учитывать при решении вышеуказанных задач. Для установления общей длительности процессов и отдельных характерных периодов сдвижения пород и земной поверхности предложено выделять три стадии: начальную, активную и затухания. Количественно эти стадии установлены на основании математической моде-

ли [1], при разработке которой использованы положения нормативного документа [2]. Они сводятся к следующему:

- продолжительность и активную стадию процесса сдвижения определяют от влияния одной горной выработки в зависимости от глубины разработки (H) и скорости подвигания очистного забоя (V_{oc});

- расчетной схемой предполагается, что окончание процессов сдвижения происходит при отработке одного выемочного участка;

- за окончание процесса условно принята дата, после которой суммарное оседание земной поверхности на протяжении шести месяцев не превышает 10% максимальных, но не более 30мм;

- одним из критериев окончания процессов является образование плоского дна мульды сдвижения на земной поверхности при удалении очистного забоя от проекции рассматриваемой точки на расстояние $(1,2 \div 1,4)H$;

- при отработке нескольких выемочных участков за окончание процесса сдвиже-

ния в точке земной поверхности считается момент времени окончания процесса сдвижения от последней горной выработки, обрабатываемой в зоне влияния на эту точку.

Опыт подработки земной поверхности показал, что не во всех случаях положения [2] соответствуют экспериментальным данным. Так при обработке нескольких лав образование плоского дна мульды сдвижения не наблюдалось [3]. Результаты статистической обработки экспериментальных данных показали, что максимальное оседание земной поверхности зависит от суммарных геометрических размеров выработанного пространства эксплуатируемой и отработанных лав, а общая длительность процессов сдвижения существенно превышает рекомендованную нормативным документом.

Кроме указанных несоответствий в документе [2] отсутствует методика определения окончания процесса сдвижения земной поверхности от времени отработки смежных очистных выработок.

Предполагается [2], что конечное оседание земной поверхности (η_k) составляет максимум $0,75 \div 0,85$ от мощности разрабатываемого пласта (m). Согласно экспериментальным данным [1] отношение η_k / m находилось в диапазоне $0,20 \div 0,82$. По своему физическому смыслу значение η_k в расчетной схеме приближается к глубине плоского дна мульды сдвижения на земной поверхности (η_0) при отработке одного выемочного участка ($\eta_k = (0,97 \div 0,99)\eta_0$). Появление плоского дна мульды на дневной поверхности (условие полной подработки), как принято в исходных положениях [1, 2], служит одним из подтверждений окончания процессов сдвижения подработанных пород.

Несоответствие между положениями, принимаемыми для математического моделирования, и экспериментальными данными, указывают на недостаточную изученность изменения параметров сдвижения подработанных пород и земной по-

верхности на разных стадиях протекания процессов и свидетельствует об актуальности рассматриваемого вопроса.

Можно предположить, что математическая модель [1] адекватно описывает процессы только для определенных горно-технических и горно-геологических условий, соответствующих принятым исходным положениям.

Целью настоящей работы является установить возможное изменение конечного оседания земной поверхности (η_k) при развитии очистных работ как в пределах одного выемочного участка, так и всего шахтного поля, и на основании полученных результатов определить область применения математической модели [1].

В качестве исходных параметров для анализа использовались сведения [1] о разрабатываемой мощности пластов (m), глубине ведения очистных работ (H), фактическом конечном оседании (η_k) земной поверхности (табл. 1). Условно приняли, что длина лав (L_l) во всех случаях составляла 200м, а обрабатываемых столбов L_{cm} – 1000м. Используя указанные исходные данные произвели расчет согласно [2] ожидаемых значений глубины плоского дна мульды сдвижения земной поверхности (η_0^p) при полной ее подработке, а также возможное максимальное оседание (η_m^p) при отработке одного выемочного столба и принятых его размерах. Аналогичные расчеты произвели по методике [4], разработанной на основании статистической обработки известных экспериментальных данных, полученных на протяжении последних пятидесяти лет.

Сравнивая экспериментальные значения η_k с расчетными величинами глубины плоского дна мульды сдвижения η_0^p , сделали вывод о полной подработке в условиях шахты «Куйбышевская». Это подтверждается близкими значениями $\eta_k = 577\text{мм}$ с расчетными η_0^p по двум методикам (соответственно 560 и 546мм).

Таблица 1 – Результаты расчета оседания земной поверхности и их сравнение с экспериментальными данными

Шахта	Экспериментальные данные согласно [1]				Расчетная глубина плоского дна мутьевы сдвижения				Расчетное максимальное оседание земной поверхности при $L_{-1} = 200 м, L_{-от} = 1000 м$				Предельный размер выемочного столба ($L_{пр}$) и максимальное оседание земной поверхности ($\eta_{пр}^p$) при закончившихся процессах					
	m, м	H, м	Марка угля	$\eta_c, мм$	$\frac{\eta_c}{m}$	Согласно [2]		Согласно [4]		Согласно [2]		Согласно [4]		Согласно [2]		Согласно [4]		
						$\eta_0^p = q_0 m, мм$	$\frac{\eta_0^p}{\eta_c}$	$\eta_0^p = q_0 m, мм$	$\frac{\eta_0^p}{\eta_c}$	$\eta_{пр}^p, мм$	$\frac{\eta_{пр}^p}{\eta_{пр}^c}$	$\eta_{пр}^p, мм$	$\frac{\eta_{пр}^p}{\eta_{пр}^c}$	$\eta_{пр}^p, мм$	$\frac{\eta_{пр}^p}{\eta_{пр}^c}$	$\eta_{пр}^p, мм$	$\frac{\eta_{пр}^p}{\eta_{пр}^c}$	
Самарская	1,02	210	Д	620	0,61	867	1,40	938	1,51	938	0,89	938	0,66	399± 441	694	0,89	935± 937	0,66
Белозерская	1,30	420	Д, Г	819	0,63	1040	1,27	1014	1,24	767	0,63	767	1,07	798± 882	520	0,63	611± 681	1,34± 1,20
Куйбышевская	0,70	750	К	577	0,82	560	0,97	546	0,95	190	3,04	119	4,85	1425± 1574	190	3,04	165± 185	3,50± 3,12
№9 Капитальная	1,15	453	К	769	0,67	920	1,20	897	1,17	586	1,71	586	1,31	861± 951	451	1,71	495± 555	1,55± 1,39
Им. А.Ф. Засядько	2,10	1200	К, Ж	426	0,20	1680	3,94	1638	3,85	189	1,10	189	2,25	2280± 2519	386	1,10	315± 343	1,35± 1,24
Глубокая	1,15	514	Т	750	0,65	920	1,23	897	1,20	437	1,89	437	1,72	977± 1079	396	1,89	425± 480	1,76± 1,56
№22, Коммунарская	1,47	652	Т	970	0,66	1176	1,21	1147	1,18	323	2,29	323	3,00	1239± 1369	423	2,29	408± 459	2,38± 2,11
Вольнская-Комсомольская	1,50	45	А	914	0,61	1125	1,23	1005	1,10	1005	0,81	1005	0,91	86±94	1125	0,81	1005	0,91

Примечание: $q_0 = 0,75 \div 0,85$ согласно [2] в зависимости от марки углей;
 $q_0' = 0,67 \div 0,92$ согласно [4] в зависимости от марки углей.

В условиях остальных шахт расчетные значения η_0^p превышали η_k в $1,10 \div 3,94$ раза. Это свидетельствует о том, что при эксплуатации рассматриваемых выемочных участков полная подработка земной поверхности не достигалась. Для этих объектов затруднительно определить значение η_k математической модели [1] без учета влияния предыдущей отработки выемочных участков в шахтном поле.

Для более детального анализа с использованием принятых конечных размеров выемочных участков ($L_n = 200\text{ м}$, $L_{cm} = 1000\text{ м}$) рассчитали по методикам [2, 4] значения максимальных оседаний (η_m^p) для указанных размеров каждого выемочного столба (табл. 1). Равенство расчетных параметров $\eta_0^p = \eta_m^p$ по методике [4] для шахт «Самарская» и «Волынская-Комсомольская» свидетельствует о возможности образования плоского дна мульды сдвижения в условиях этих шахт при отработке одного выемочного участка. Такое предположение подтверждается и расчетами по методике [2] для шахты «Волынская – Комсомольская» ($\eta_0^p = \eta_m^p = 1125\text{ мм}$).

Для других шахт получено неравенство $\eta_0^p > \eta_k > \eta_m^p$, что указывает на отсутствие полной подработки при эксплуатации одного выемочного участка. Неравенства $\eta_k > \eta_m^p$ характеризовались отношениями η_k / η_m^p , которые для обеих методик достигали соответственно 3,04 и 4,85. Такую разницу между η_k и η_m^p можно объяснить влиянием отработки угольных пластов смежными выемочными участками на увеличение фактического оседания земной поверхности η_k , которая не учитывалась при определении η_m^p .

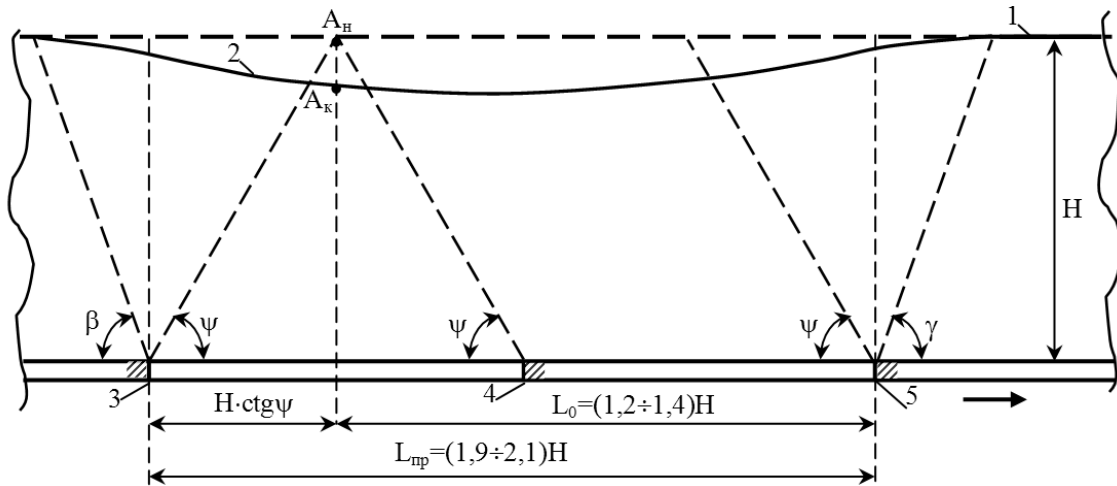
Процесс сдвижения подработанных пород и земной поверхности, параллельно с условиями максимального оседания, счи-

тается закончившимся при удалении очистного забоя от проекции подработанной точки на расстояние $L_0 = 1,2 \div 1,4H$ [2]. Согласно этому положению и рекомендуемым [2] углам полных сдвижений ($\psi = 55^\circ$), предельный размер выемочного столба (L_{np}) должен составлять, исходя из расчетной схемы (рис. 1), не менее

$$L_{np} = (1,9 \div 2,1)H. \quad (1)$$

Процессы сдвижения подработанных пород и земной поверхности при таком подходе должны заканчиваться для глубин более 500 м при предельной длине выемочных столбов (L_{np}) значительно превышающей 1000 м (табл. 1). Это свидетельствует о возможном продолжении процессов сдвижения над значительной частью выработанного пространства после отработки отдельного выемочного столба, так как его реальные размеры в большинстве случаев составляют максимум $1000 \div 1500\text{ м}$. Расчетные значения максимального оседания земной поверхности (η_m^p) согласно методикам [2, 4] по критерию уравнения (1) в большинстве случаев значительно меньше конечных фактических величин η_k (табл. 1). Это также подтверждает предположение о продолжении процессов сдвижения после прекращения очистных работ в пределах одного выемочного участка. Конечное значение η_k в этих случаях определяется размерами отработанного выемочного столба и выработанными пространствами ранее эксплуатируемых участков, а также продолжением ведения очистных работ в смежных лавах.

Общая длительность процессов сдвижения подработанных пород в значительной степени связана с максимальным оседанием земной поверхности в период ведения очистных работ (η_m^p). При расчете этого параметра, согласно нормативному документу [2], предполагается, что процессы сдвижения пород полностью закончились и в дальнейшем оседание земной поверхности не происходит.



1 – земная поверхность; 2 – мульда сдвижения; 3 – неподвижная стенка разрезной печи; 4 – положение очистного забоя, при котором начинается активная стадия оседания точки (A_n); 5 – положение очистного забоя, при котором прекращается оседание точки (A_k); ψ – угол полных сдвижений; β , γ – граничные углы соответственно у разрезной печи и у очистного забоя; H – глубина ведения работ; \longrightarrow – направление подвигания очистного забоя.

Рисунок 1 – Схема к определению предельной длины выемочного столба L_{np} при условии прекращения оседания точки земной поверхности ($A_n - A_k$) согласно [2].

По этой причине исходная расчетная величина q_0 , равная отношению глубины плоского дна мульды сдвижения η_0 к мощности пласта m , считается постоянной для одних горно-геологических условий. По своему физическому смыслу параметр q_0 – это оседание массива горных пород на верхней границе полных сдвижений в главном сечении мульды земной поверхности [5].

Параметр (q_0) при незакончившихся процессах сдвижения подработанных пород может изменяться. Подтверждением этому являются результаты работы [6], согласно которым вертикальные сдвижения в динамической мульде растут с увеличением размеров выработанного пространства.

Методикой определения η_m^p предполагается [2], что при отработке одного выемочного участка возможно образование плоского дна мульды сдвижения на земной поверхности глубиной $(0,75 \dots 0,85)m$. Анализ экспериментальных данных показал, что плоское дно мульды сдвижения на земной поверхности при отработке одного

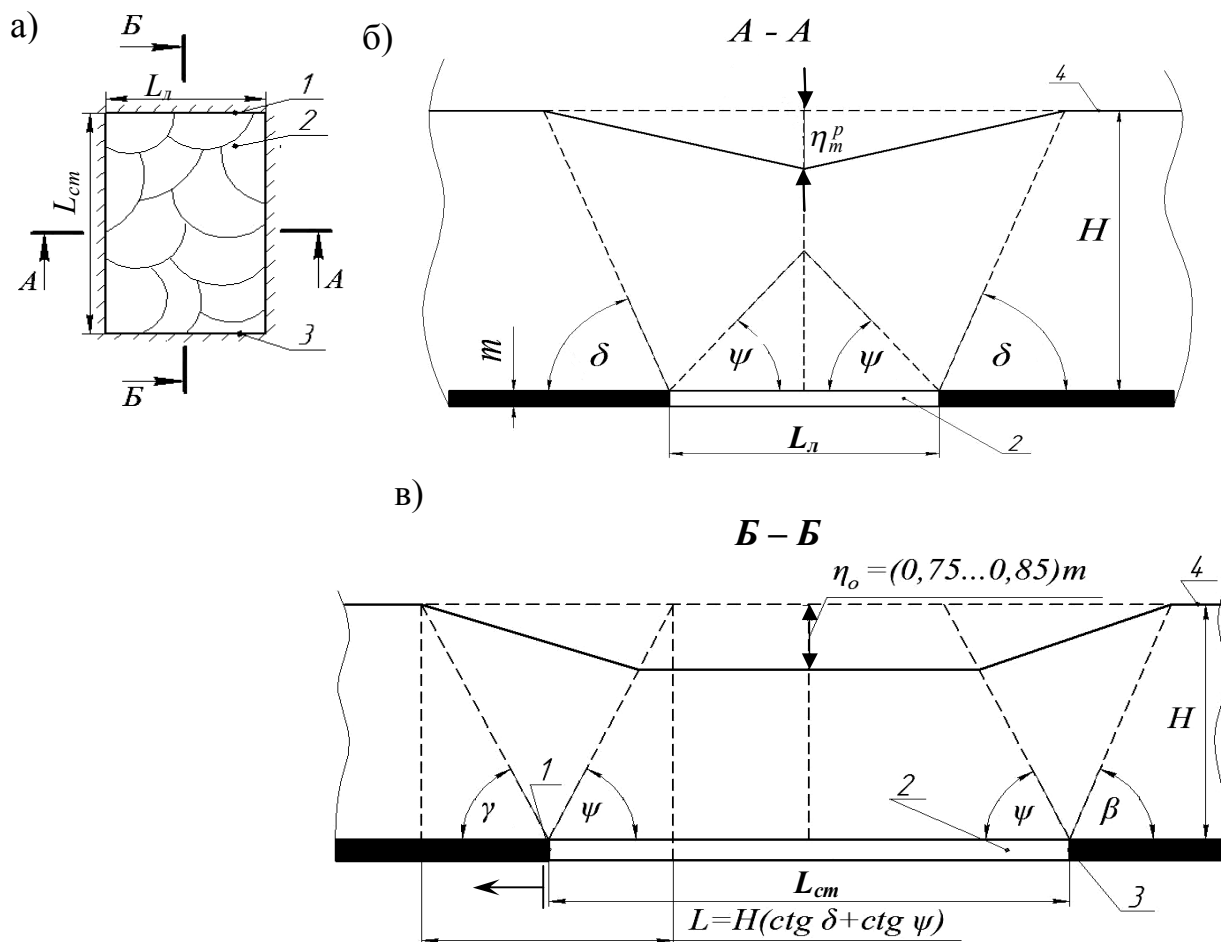
выемочного участка образовывалось только в условиях Западного Донбасса [7]. При выемке антрацитовых пластов даже при отработке нескольких лав плоское дно мульды сдвижения не появилось [3].

При отработке одной лавы заранее предполагается [2] полная подработка земной поверхности по длине выемочного столба (L_{cm}) в вертикальной плоскости главного сечения мульды, перпендикулярной очистному забою, а по длине лавы (L_n) в вертикальной плоскости, параллельной очистному забою – необходимо производить проверку возможности образования плоского дна мульды сдвижения. Основные положения действующей методики определения рассматриваемых параметров мульды сдвижения в геометрической интерпретации приведены на рисунке 2. При расчете максимального оседания земной поверхности принимается во внимание длина лавы (L_n) и наличие целиков угля или угольного массива у границ очистной выработки (рис. 2, б). Влияние ранее отработанных лав методикой не преду-

считывается. Учитывая предположение, что размер выемочного столба обеспечивает образование плоского дна мульды сдвига земной поверхности ($L_{cm}/H \geq 1,2 \div 1,4$) и процессы сдвига подработанных пород под ним (плоским дном) уже завершены, рассмотрели методику [2] определения длительности процессов

сдвига над остановленным очистным забоем (рис. 2, в).

Её суть заключается в определении периода времени, за который очистной забой прошел бы расстояние (L), равное длине проекции полумульды при эксплуатации выемочного участка.



1 – очистной забой остановленной лавы; 2 – выработанное пространство (очистная выработка); 3 – неподвижная стенка разрезной печи; 4 – земная поверхность; $L_{л}$, $L_{см}$ – соответственно длина лавы и выемочного столба; m – мощность пласта; H – глубина ведения очистных работ; ψ – угол полных сдвижений; β , γ , δ – граничные углы влияния очистной выработки; η_m^p – рассчитываемое максимальное оседание земной поверхности; η_0 – глубина плоского дна мульды сдвига исходя из предположения, что

$$L_{cm}/H \geq 1,2 \div 1,4; \leftarrow \text{направление подвигания очистного забоя.}$$

Рисунок 2 – Схема к методике [2] расчета максимального оседания земной поверхности (η_m) и определения глубины плоского дна мульды сдвига (η_0) после отработки одного выемочного участка

Определение длительности процессов сдвижения подработанных пород и земной поверхности путем деления длины проекции полумульды (L) на скорость подвигания очистного забоя при его эксплуатации ($V_{оч}$) является не вполне корректным и обоснованным. При таком подходе с увеличением $V_{оч}$ уменьшается расчетная длительность процессов сдвижения подработанных пород и земной поверхности над остановленным очистным забоем, что противоречит общепринятым положениям влияния скорости на механизм сдвижения пород.

С ростом скорости подвигания очистного забоя увеличивается пролет ослабленных пород (расстояние от забоя до линии соприкосновения кровли с обрушенными породами при полном обрушении или с почвой пласта при плавном опускании) и уменьшается угол наклона подработанной толщи, в том числе пород основной и непосредственной кровель, вследствие чего смещение кровли на фиксированном расстоянии от линии забоя уменьшается. Об этом свидетельствуют выполаживание мульды сдвижения на дневной поверхности и увеличение пролета ослабленных пород в толще подработанного массива [8]. С увеличением скорости подвигания очистного забоя уменьшается интенсивность оседания пород кровли. По этой причине после остановки очистного забоя с высокой скоростью подвигания следует ожидать большие оседания земной поверхности в мульде сдвижения. Меньшие значения η_m на стадии ведения очистных работ обуславливают условия для потенциально более длительных процессов сдвижения и уплотнения пород вследствие увеличения разности $m - \eta_m$.

Принципы определения длительности процессов сдвижения и уплотнения пород с использованием скорости подвигания очистного забоя (рис. 2, в) не позволяют применить такой же подход, рассматривая процессы в главном сечении мульды вер-

тикальной плоскостью, параллельной очистному забою (рис. 2, б).

Приведенный анализ действующей методики [2] определения максимального оседания земной поверхности (η_m^p) указывает на имеющиеся недостатки, обусловленные как общими подходами к решению данной задачи, так и использованием в расчетах некоторых параметров, значение которых не соответствуют практике ведения очистных работ.

На основании анализа экспериментальных данных об оседании земной поверхности и их расчетных значений для характерных размеров выемочных участков сделаны следующие выводы:

- исходя из того, что в большинстве рассмотренных случаев отношение расчетной глубины плоского дна мульды сдвижения к фактически измеренным оседаниям (η_0^p / η_k) существенно превышает единицу (до 3,94), следует, что в рассмотренных реальных условиях полная подработка земной поверхности не происходила;

- при длине лав 200м и выемочных столбов 1000м полная подработка земной поверхности возможна если расчетная глубина плоского дна мульды сдвижения равна максимальному расчетному оседанию. Такие расчетные параметры характерны при ведении очистных работ на небольших глубинах (шахты «Самарская» и «Волинская-Комсомольская»);

- в условиях шахты «Куйбышевская» плоское дно мульды сдвижения образовано за счет размеров выработанного пространства ранее отработанных лав, так как конечное фактическое оседание примерно равно расчетному значению глубины плоского дна мульды сдвижения, а расчетное максимальное оседание земной поверхности после отработки одного выемочного участка в несколько раз меньше ее фактической величины;

- при отработке половины одиночных выемочных участков с размером ($L_n = 200м$, $L_{cm} = 1000м$) условие норма-

тивного документа о прекращении процессов сдвижения подработанных пород и земной поверхности (удаление очистного забоя от проекции точки на земной поверхности на расстояние более $1,2 \div 1,4$ глубины ведения горных работ) не выполняется, так как длина выемочных столбов в реальных условиях значительно меньше указанного критерия окончания процессов. Это свидетельствует о возможности продолжения процессов сдвижения подработанных пород и земной поверхности после отработки одиночного выемочного участка;

- применение параметра конечного оседания земной поверхности (η_k) в матема-

тической модели [1] возможно при глубине ведения очистных работ не более 500м и длине выемочного столба не менее 1000м;

- для разработки математической модели, адекватно описывающей стадии протекания процессов сдвижения подработанных пород и земной поверхности, необходимо устранить противоречия в положениях нормативного документа, определяющих общую длительность процессов сдвижения как по величине максимального оседания земной поверхности, так и по предельным размерам выемочного столба.

Библиографический список:

1. Гавриленко Ю.Н. Прогнозирование сдвижений земной поверхности во времени / Ю.Н. Гавриленко // Уголь Украины. – 2011. - №6. – С. 45-49.

2. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. Видання офіційне. Мінпаливенерго України: ГСТУ 101.00159226.001-2003. – Київ.: 2004. – 128с. (Галузевий стандарт України).

3. Борзых А.Ф. Влияние ширины выработанного пространства на активизацию сдвижения угленосного массива / А.Ф. Борзых, Е.П. Горовой // Уголь Украины. – 1999. - №9. – С. 26-30.

4. Антощенко Н.И. Совместное влияние двух размеров очистной выработки на максимальное оседание земной поверхности / Н.И. Антощенко, Л.А. Чепурная, М.В. Филатьев // «Форум гірників-2012». – Матеріали міжн. конференції 3-6 жовтня 2012р. – Том 2. – Дніпропетровськ, НГУ. – 2012. – С. 246-250.

5. Кулибаба С.Б. Прогноз оседания земной поверхности при разработке угольных пластов на больших глубинах / С.Б. Кулибаба, М.Д.Рожко // Уголь Украины. – 2007. - №2. – С.10 – 12.

6. Петрук Е.Г. Прогнозирование деформаций в первой зоне динамической мульды / Е.Г. Петрук // Уголь Украины. – 1997. - №3. – С. 67 – 68.

7. Ларченко В.Г. Влияние подземной разработки угольных пластов на состояние земной поверхности / В.Г. Ларченко // Вестник МАНЭБ - №4(12). – С.-Петербург. – 1998. – С. 39-41.

8. Дмитриев В.А. О влиянии скорости подвигания очистного забоя на смещение кровли / В.А. Дмитриев // Уголь Украины. – 1980. - №5. – С. 10 – 11.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Окаленовым В.Н.