

УДК 622.268.1:622.831.232

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.01.047

**Савенко Андрей Владимирович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Республиканский академический  
научно-исследовательский и  
проектно-конструкторский институт  
горной геологии, геомеханики,  
геофизики и маркшейдерского дела  
(РАНИМИ),  
Украина, 83004, г. Донецк,  
ул. Челюскинцев, 291  
e-mail: [savenko-miner@mail.ru](mailto:savenko-miner@mail.ru)

**Savenko Andrey V.**

candidate of technical sciences,  
senior researcher,  
Republican Academic Scientific-Research  
and Design Institute of Mining Geology,  
Geomechanics, Geophysics  
and Mine Survey,  
291, Chelyuskintsev str.,  
83004, Donetsk, Ukraine  
e-mail: [savenko-miner@mail.ru](mailto:savenko-miner@mail.ru)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ОЧИСТНЫХ РАБОТ НА БОЛЬШИХ  
ГЛУБИНАХ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ  
ПОДВИГАНИЯ ЛАВЫ НА СДВИЖЕНИЕ  
ПОВЕРХНОСТИ****STUDY OF THE EFFECT OF SEWAGE  
TREATMENT WORKS AT GREAT DEPTHS  
AND AT HIGH SPEEDS THE HEADING  
OF LAVA SUBSIDENCE AT THE SURFACE***Аннотация:*

Проведены аналитические исследования влияния очистных работ на большой глубине при большой скорости подвигания лавы на сдвигение земной поверхности. С помощью МГУА получены математические модели скорости деформаций в зависимости от глубины разработки, скорости подвигания очистного забоя и продолжительности процесса сдвижений.

*Ключевые слова:* угольный пласт, очистные работы, породный массив, сдвигение земной поверхности, скорость деформаций, ускорение оседания поверхности

*Abstract:*

Conducted analytical research of influence of sewage treatment works at great depths and at high speeds the heading of lava at the earth surface strike shift. Using GMDH obtained mathematical model of the strain rate from the depth of development, rate of heading slope and the duration of the process of displacement.

*Key words:* coal seam, sewage treatment works, rock mass, movement of the earth's surface, the rate of deformation, acceleration of the surface subsidence

Выемка угля современными технологиями со скоростью подвигания очистных забоев до 200 м/мес сопровождается техногенными воздействиями на всю геологическую толщу горных пород, находящуюся над вынимаемым пластом и частично под ним. Видимое проявление этого – сдвигение земной поверхности и горное давление. Теоретическое представление сдвигения горного массива и земной поверхности, наиболее соответствующее реально происходящему процессу, позволяет описать, объяснить и предвидеть явления, которые могут возникнуть при подземной выемке угля.

Сдвигения земной поверхности, которые происходят вследствие выемки угля и опускания всего массива горных пород, достаточно хорошо изучены. Однако методы расчета величины оседания земной поверхности, разработанные для охраны подрабатываемых объектов, ограничены и предназначены для глубины отработки до 800 м и скорости подвигания лавы до 80 м/мес. Современные скорости подвигания очистных забоев влияют на перераспределение напряжений и продолжительность развития деформаций растяжения и сжатия в динамической мульде сдвигения и, соответственно, на параметры оседания земной поверхности. Поэтому представляет интерес изучение процессов сдвигения массива горных пород и земной поверхности при большой глубине разработки и высокой скорости ведения очистных работ.

При подземной добыче угля массив горных пород находится в динамическом состоянии. В 1997 г. специалистами ДонГТУ под руководством Ю.Н. Гавриленко были

выполнены инструментальные наблюдения смещения массива горных пород и земной поверхности на территории шахтного поля АП «Шахта им. А.Ф. Засядько» [1]. Исследования проводились одновременно с началом работ в 13-й западной лаве пл. тз.

Выбор объекта исследования обоснован большой глубиной ведения работ и высокой скоростью подвигания очистного забоя. Работы в лаве велись на глубине 1195 м. Мощность пласта достигала 2,1 – 2,3 м; длина лавы 250 м, а длина столба 1800 м. Лавы были оборудованы механизированным комплексом ЗКД90 и комбайном 1ГШ68. Отработка столба велась обратным ходом по сплошной системе отработки без оставления целиков. Способ управления кровлей – полное обрушение.

На основании инструментальных наблюдений в работе [1] сделан вывод, что скорость оседания земной поверхности при глубине ведения работ 1200 м и скорости подвигания очистного забоя до 100 м/мес достигает 50 – 60 мм/мес. Продолжительность сдвижений в этих условиях оценивается от 17 до 20 месяцев. В источнике [2], на основании материалов [1], приведен расчет параметров оседания поверхности, однако время сдвижений оценивается в 20 месяцев. Расхождения в оценке результатов исследования невелики и говорят о различиях в подходе к решению этой задачи.

Из материалов исследований [1] видно, что процессы деформации земной поверхности происходят с различной скоростью в разные периоды времени. Неоднородность скоростей опускания земной поверхности вследствие ведения горных работ указывает на наличие ускорения (замедления) в процессе развития деформации в толще горных пород и на поверхности Земли. Очевидно, что изменение скорости развития деформационных процессов в породном массиве связано с изменением напряженно-деформированного состояния массива горных пород от очистного забоя до дневной поверхности.

Для построения математической модели процессов сдвижения принят метод группового учета аргументов (МГУА). Алгоритмы МГУА реализуют принципы самоорганизации сложных систем [3, 4]. Согласно этим принципам, при постепенном усложнении структуры модели значение внешнего критерия сначала уменьшается, а затем возрастает, проходя при этом через минимум, определяющий модель оптимальной сложности и максимальной точности. Поскольку аналитическая зависимость величины критерия от сложности модели не известна, задача поиска минимума критерия решается методом математической индукции при помощи целенаправленного перебора многих моделей-претендентов.

Однорядные алгоритмы МГУА предназначены для решения определенных и переопределенных задач, когда количество наблюдений значительно превосходит число аргументов. Многорядные алгоритмы применяются для решения недоопределенных задач моделирования [5], когда имеется несоответствие между объемом имеющейся информации и количеством моделируемых факторов.

В алгоритмах МГУА используются следующие виды опорных функций: линейные уравнения, полиномы с ковариациями переменных и квадратичные зависимости. Другие алгоритмы МГУА – с последовательным выделением трендов, с мультипликативными моделями, со случайным выбором партнеров, а также обобщенные алгоритмы [6, 7], которые применяются в основном для решения кибернетических задач.

В зависимости от назначения будущей модели используются критерии регулярности, несмещенности и баланса переменных. Возможно также последовательное или комбинированное применение нескольких критериев.

Сравнительные исследования [8] показали, что метод группового учета аргументов, основанный на самоорганизации моделей, определении структуры модели оптимальной сложности, имеющий высокую помехозащищенность за счет применения внешних критериев селекции, позволяет получать наиболее простые и точные модели при решении многофакторных задач в условиях дефицита наблюдений и высокой зашумленности исходных данных. Поэтому для формирования математических моделей процес-

сов сдвижения наиболее целесообразно использовать этот метод формализации зависимостей.

К анализу приняты материалы нормативного документа [9] и исследований, приведенных в [1]. В таблице 1 приведены использованные значения скорости развития деформаций и продолжительность процесса деформаций для конкретных скоростей подвигания очистного забоя и глубин разработки [9].

Таблица 1

**Исходные данные для моделирования  
скорости развития деформаций в горном массиве**

Глубина разработки, м	Продолжительность процесса сдвижений, мес.(числитель) / Скорость развития деформаций по плоскости сдвижения, м/сут (знаменатель)		
	Скорость подвигания очистного забоя, м/мес		
	30	50	70
100	5/2	4/2,5	3/3,3
300	13/2,3	8/3,8	6/5
500	22/2,3	18/2,8	10/5
700	30/2,3	19/3,7	13/5,4
1000	44/2,3	20/5	19/5,3

Массив данных из источника [3] обработан при помощи МГУА. Получена эмпирическая зависимость скорости деформаций от глубины разработки, скорости подвигания очистного забоя и продолжительности процесса сдвижений.

$$v_d = -6,3 \cdot 10^{-6} \cdot t_d^3 - 0,004 \cdot t_d + 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot v_{оз}^3 - 0,0002 \cdot v_{оз}^2 + 0,0014 \cdot H_p + 1,6, \quad \text{м/мес} \quad (1)$$

где  $v_d$  – скорость развития деформаций по плоскости сдвижения, м/сут;

$v_{оз}$  – скорость подвигания очистного забоя, м/мес ( $30 < v_{оз} < 150$ );

$H_p$  – глубина разработки, м ( $300 < H_p < 1500$ );

$t_d$  – продолжительность процесса сдвижений, мес ( $0 < t_d < 50$ ).

Относительная ошибка в поле исходных данных для зависимости (1) составляет менее 10 %, что является достаточной точностью для решения задач в горном деле.

В результате многочисленных инструментальных наблюдений в разные годы установлено, что скорость оседания земной поверхности не одинакова в течение всего периода оседания [10, 11]. Максимальное значение скорости деформации земной поверхности разделяет зоны деформаций растяжения и сжатия [2, 12 – 15]. Однако по изменению скорости оседания поверхности Земли определить время смены напряжений затруднительно. Наиболее точно выявить время чередования напряжений возможно при вычислении значений ускорения смещений, поскольку значения ускорения в это время должны принимать нулевые значения.

По результатам маркшейдерских наблюдений за оседанием поверхности сделан вывод, что процесс смещения поверхности состоит из трех фаз: начальной, активной и затухания [1].

Начальный этап сдвижений для данных горно-геологических условий длится более 3 месяцев. На этом этапе смещения невелики, однако их скорость быстро увеличивается.

Этап активных деформаций характеризуется интенсивным оседанием массива горных пород; согласно [2, 6, 7], в течение этого периода времени происходит основная часть всех смещений. Скорость оседания принимает максимальные значения. Интенсивное опускание массива горных пород обуславливает рост напряжений растяжения в толще вмещающих пород. В этот промежуток времени происходит расслоение массива горных пород и разрушение слоев. В дальнейшем, после разрушения сплошности геологической толщи, происходит смена напряжений растяжения напряжениями сжатия. Это приводит к снижению интенсивности смещений в массиве горных пород и уменьшению скорости оседания поверхности.

На завершающем этапе происходит затухание процесса сдвижений в массиве горных пород, и, как следствие, оседание поверхности прекращается.

Исходя из того, что максимальные смещения происходят в течение активной фазы, целесообразно исследовать именно этот период времени. Данные инструментальных наблюдений, соответствующие активной фазе оседания, проанализированы при помощи метода группового учета аргументов. В результате получена зависимость смещений поверхности от времени.

$$h = 7,543 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0,007 \cdot t^2 + 709,311, \text{ мм}, \quad (2)$$

где  $h$  – оседание земной поверхности, мм;

$t$  – продолжительность процесса оседания, сут.

Для дальнейшего анализа уравнение (2) про дифференцировано по времени и получены выражение (3) скорости оседаний земной поверхности от времени для данных горно-геологических и горнотехнических условий и выражение (4) ускорения процессов оседания земной поверхности.

$$v_{\text{ос}} = 2,263 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,014 \cdot t, \text{ мм/сут}, \quad (3)$$

где  $v_{\text{ос}}$  – скорость оседания земной поверхности, мм/сут.

По результатам расчетов по формуле (3) построен график зависимости скорости смещения земной поверхности от времени (рис 1). Анализ результатов расчета и графика показал, что параметры скорости оседания земной поверхности, вычисленные по формуле (3) и приведенные в [1], близки по значению: максимальные значения скорости, вычисленные по предложенной зависимости (3), 64 мм/мес; выводы, сделанные в источнике [1], указывают на значения максимальной скорости 60 мм/мес. Относительная ошибка в поле исходных данных для формулы (2) составляет не более 7 %.

$$a = 4,526 \cdot 10^{-5} \cdot t - 0,014, \text{ мм/сут}^2. \quad (4)$$

По зависимости (4) рассчитаны значения ускорения смещений поверхности и построена кривая (см. рис. 1) для условий АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», приведенных в [1]. Из графика видно, что ускорение оседания поверхности принимает максимальные значения в начальный и конечный периоды фазы активных деформаций. Наиболее важным является изменение знака ускорения. Время, при котором ускорение меняет знак, указывает момент смены напряжений растяжения и сжатия при оседании земной поверхности.

Для дальнейшего анализа полученных результатов проведен расчет значений скорости развития деформационных процессов в массиве горных пород по установленной зависимости (1). К расчету принимаем глубину разработки, скорость подвигания забоя, время активной стадии оседания в соответствии с [1]. По результатам расчета построен совмещенный график (см. рис. 1), который показал, что скорость развития деформаций

в горном массиве по плоскости сдвижения не одинакова.

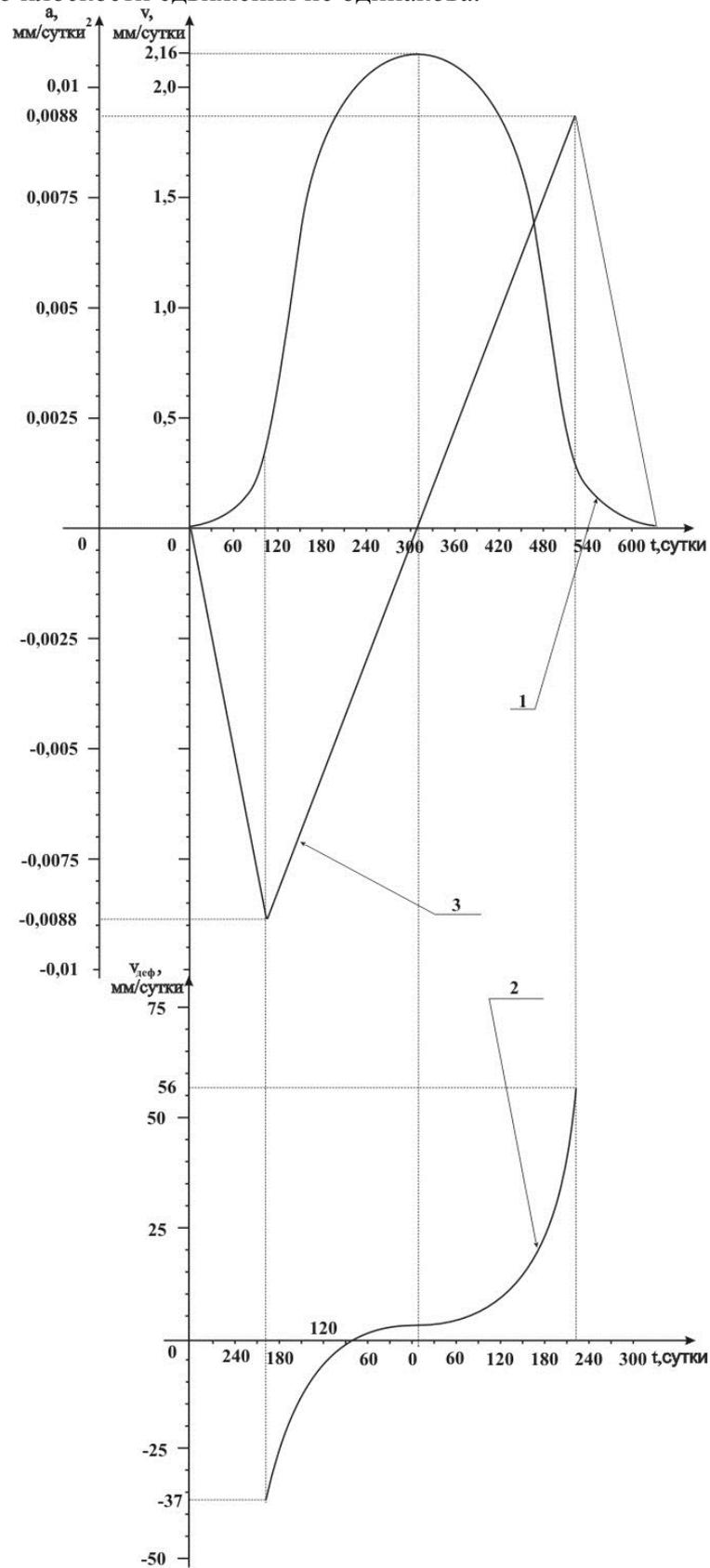


Рис. 1 – Совмещенные графики скорости и ускорения оседания земной поверхности и скорости деформации массива горных пород по плоскости сдвижения:  
1 – скорость оседания земной поверхности; 2 – скорость деформации массива горных пород по плоскости сдвижения; 3 – ускорение оседания земной поверхности

Время, при котором скорость принимает нулевое значение, указывает на смену напряжений растяжения напряжениями сжатия в массиве горных пород. Разница между временем, когда ускорение оседания поверхности земли и скорость развития деформаций в массиве горных пород принимают нулевые значения, равна 78 суткам. Этот период времени отличается от расчетного [2] и полученного в ходе маркшейдерских измерений запаздывания между началом оседания реперов 1 и 8 на поверхности [1] на 8,2 %, что подтверждает работоспособность зависимости (1). Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Оседание земной поверхности вследствие подземной разработки угольных пластов происходит со знакопеременным ускорением, причем время изменения знака указывает на смену напряжений растяжения напряжениями сжатия в динамической мульде сдвижений.

2. Скорость развития деформационных процессов в массиве горных пород изменяется в течение всего времени развития деформаций. Время, при котором скорость деформаций принимает нулевое значение, указывает на смену растягивающих напряжений сжимающими в массиве горных пород.

Получена новая эмпирическая зависимость, позволяющая прогнозировать скорости развития деформации для глубины разработки до 1500 м и скорости подвигания лавы до 150 м/мес с относительной ошибкой в поле исходных данных до 9 %.

### Литература

1. Гавриленко Ю.Н. Динамика оседаний земной поверхности при большой глубине разработки и высокой скорости подвигания забоя / Ю.Н. Гавриленко, Н.М. Папазов, Т.В. Морозова // Проблемы гірського тиску: Зб. наук. праць – 2004. – №. 4. – Донецьк: Донецький національний технічний університет. – С. 108 – 119.
2. Четверик М.С. Теория сдвижений массива горных пород и управление деформационными процессами при подземной выемке угля / М.С. Четверик, Е.В. Андрощук. – Днепропетровск: РИА "Днепр-VAL", 2004. – 148 с.
3. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации сложных систем / А.Г. Ивахненко. - Киев: Наукова думка, 1981. - 296 с.
4. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашков. - Киев: Наукова думка, 1985. - 216 с.
5. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер. - Киев: Техника; Берлин: ФЕБ Ферлаг Техник, 1984. - 223 с.
6. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. - М.: Радио и связь, 1987. - 120 с.
7. Юрачковский Ю.П. Восстановление полиномиальных зависимостей на основе самоорганизации / Ю.П. Юрачковский // Автоматика. - 1981. - № 4. - С. 15 - 20.
8. Антипов И.В. Применение МГУА для формализации производственных процессов и операций в очистных забоях / И.В. Антипов, И.А. Турбор // Физико-технические проблемы горного производства. Вып. 15. Физические, геомеханические и технологические проблемы добычи полезных ископаемых. – Донецк: Институт физики горных процессов НАН Украины, 2012. – С. 55 - 63.
9. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях. Утв. Минуглепром СССР. - М.: Недра, 1981. – 288 с.
10. Кулибаба С.Б. Исследование скорости распространения процесса сдвижения в подрабатываемом массиве горных пород / С.Б. Кулибаба // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2004. – № 1. – С. 78 – 82.

11. Кулибаба С.Б. Расчет сдвижений и деформаций толщи горных пород при подземной разработке угольных месторождений / С.Б. Кулибаба // Геологія і геохімія горючих копалин. – 1998. – № 4. – С. 98 – 100.

12. Четверик М.С. Сдвигение земной поверхности и геомеханические процессы в подработанном массиве при разработке пологих пластов угля / М.С. Четверик, И.Ф. Озеров // Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. трудов. – 1998. – № 9. – С.64 – 70.

13. Четверик М.С. Геомеханическая модель сдвижения геологической толщи и земной поверхности при выемке угля / М.С. Четверик, И.Ф. Озеров // Сборник научных трудов горной академии Украины. – 2000. – № 9. – Т. 2. – С. 3 – 7.

14. Петрук Е.Г. Управление деформационными процессами в динамической мульде сдвижения при подземной разработке пологих угольных пластов: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Е.Г. Петрук. – Днепропетровск, 1994. – 38 с.

15. Гаврюк Г.Ф. Особенности формирования динамической и статической мульды сдвижения при разработке Никопольского марганцевого месторождения / Г.Ф. Гаврюк, Г.А. Антипенко // Сборник научных трудов горной академии Украины. – 2000. – № 10. – С. 147 – 151.