

УДК 622.834

ХАРАКТЕР РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ НАД ДВИЖУЩИМСЯ ОЧИСТНЫМ ЗАБОЕМ

Кулибаба С. Б., Рожко М. Д., Хохлов Б. В.
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

На основі аналізу експериментальних даних запропоновано функцію гіперболічного тангенса для математичного опису розвитку процесу зрушення земної поверхні над очисним вибоєм, що рухається. Усередині періоду процесу зрушення виділено інтенсивну стадію його розвитку, визначено її часові межі і встановлено залежність моменту її початку від глибини підробки.

Based on the experimental data analysis we propose hyperbolic tangent function for mathematical formulation of the process of development of surface movement above a moving working face. In the interior of the process of movement we determined intensive stage of its development. We also determined time boundaries of the development stage and dependence of its onset time on undermining depth.

Определение закономерностей развития процесса сдвижения во времени является одной из основных задач, возникающих при прогнозировании последствий подработки. Достоверный прогноз временных параметров процесса сдвижения имеет большое практическое значение, поскольку позволяет ответить на ряд важных вопросов, связанных с подработкой объектов.

Под продолжительностью процесса сдвижения понимают период, в течение которого земная поверхность находится в состоянии сдвижения вследствие влияния очистных работ. Внутри общего периода сдвижения принято выделять три стадии: начальную, активную и затухания [1]. Вплоть до настоящего вре-

мени эти параметры рассчитывались достаточно условно и схематично, и в современных условиях больших глубин разработки существующий подход к их определению нельзя признать полностью корректным. Основным его недостатком является отсутствие четких и однозначных методов определения временных рамок протекания как всего процесса сдвижения земной поверхности, так и его стадий.

Наиболее перспективным, на наш взгляд, направлением в решении данной проблемы представляется подход, предложенный проф. Гавриленко Ю. Н. [2], при котором стадии процесса сдвижения разделяются с помощью характерных точек математической функции, описывающей развитие оседания земной поверхности во времени. В качестве таких точек предложено использовать экстремумы первых трех производных по времени от основного уравнения, описывающего изменение оседания точки земной поверхности в процессе сдвижения:

$$f(t) = \eta_k \left(1 - e^{-\beta_1 t^2} \right), \quad (1)$$

где η_k – конечная величина оседания точки земной поверхности;

β_1 – эмпирический коэффициент, определяемый по данным наблюдений;

t – время, прошедшее с момента начала процесса сдвижения.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований.

В период 2008-2009 гг. по рекомендациям УкрНИМИ НАН Украины была осуществлена подработка наклонных стволов шахты "Ждановская" 11-й восточной лавой пласта k_3 шахты № 22 "Коммунарская" ГОАО "Шахтоуправление Донбасс" [3]. С целью инструментального контроля над процессом сдвижения до начала подработки на земной поверхности в районе устьев подрабатываемых стволов была заложена наблюдательная станция, состоящая из двух профильных линий грунтовых реперов. Благодаря тому, что инструментальные наблюдения на данной станции проводились регулярно с частотой, как правило, один раз в месяц, эти результаты оказались весьма показательными и удобными

для изучения временных параметров этого процесса. Этому также способствовали горнотехнические условия подработки – одиночная лава с постоянной скоростью подвигания очистного забоя.

На рис. 1 показаны графики развития оседаний ряда реперов данной наблюдательной станции во времени.

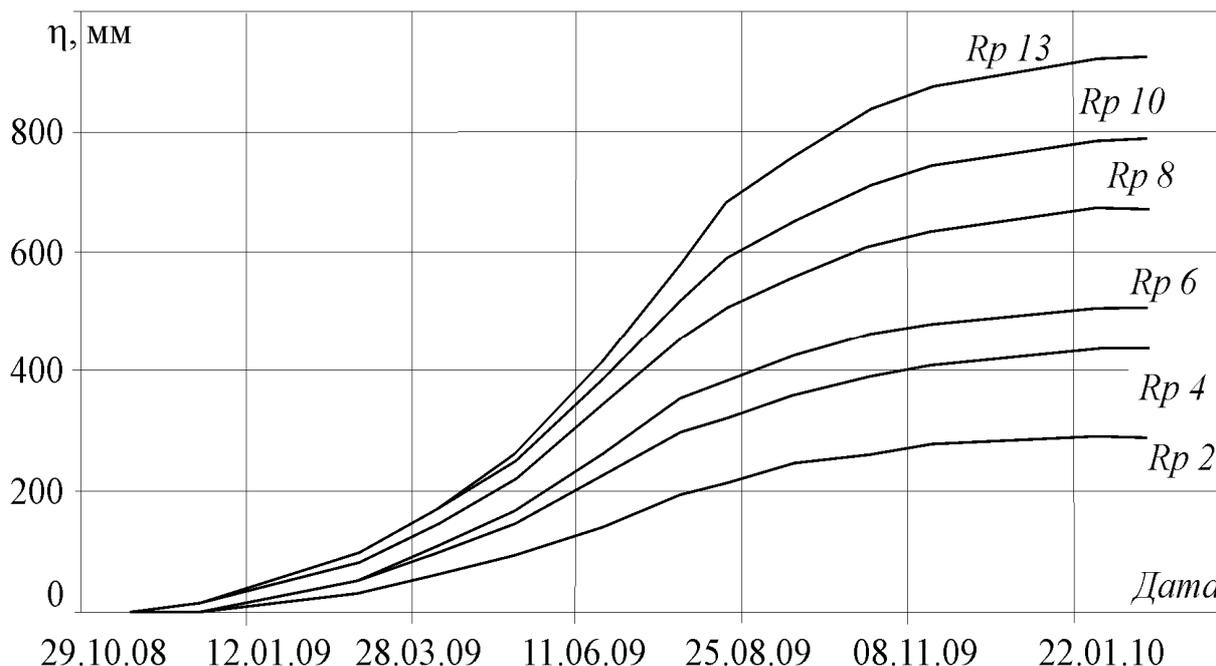


Рис. 1. Оседания реперов во времени

Предварительный анализ этих графиков позволяет отметить следующие их особенности:

– инструментальными наблюдениями по реперам профильной линии зафиксированы все стадии процесса сдвижения земной поверхности – от его начала до затухания;

– каждый из приведенных графиков обладает заметной центральной симметрией относительно некоторой средней точки.

Форма и свойства графика оседания во времени каждого репера присущи функции гиперболического тангенса, с помощью которой можно аппроксимировать распределение фактических данных, и имеющей в общем случае следующий вид:

$$f(t) = k_0 + k_1 th(k_2 t + k_3), \quad (2)$$

где t – текущая координата времени, равная разности дат между рассматриваемым моментом и началом процесса сдвижения;

$k_0 - k_3$ – эмпирические коэффициенты.

Учитывая, что в рассматриваемом случае экспериментально зафиксированы все стадии процесса сдвижения – от его начала до затухания, а, следовательно, известны конечные значения оседаний и общего периода сдвижения, для более детального анализа нормируем приведенные графики по обоим параметрам – по максимальному оседанию каждого репера и по общей продолжительности процесса сдвижения:

$$\begin{aligned}\eta_{Hi} &= \frac{\eta_i}{\eta_{max_i}} ; \\ t_{Hj} &= \frac{t_j}{T_{общ.}} ;\end{aligned}\tag{3}$$

где η_i и η_{max_i} – соответственно текущее и максимальное оседание i -го репера;

t_j – период сдвижения этого репера от начала процесса сдвижения до j -й серии наблюдений;

$T_{общ.}$ – общая продолжительность процесса сдвижения.

На рис. 2 точками показаны нормированные графики фактических оседаний реперов профильной линии 1-19, а сплошной линией – график уравнения (2), параметры которого определены способом наименьших квадратов при $t = t_H$. Для сравнения на этом же рисунке пунктиром показан график предложенной в работе [2] функции (1), параметры которой для этой же совокупности фактических данных получены аналогичным способом. Из сравнения видно, что кривая функции (2) описывает фактические данные более точно.

Следует отметить, что фактические точки на графике рис. 2 все же имеют некоторый разброс относительно аппроксимирующей функции. Это, видимо, связано с тем, что временные параметры сдвижения точек земной поверхности в разных частях мульты несколько отличаются. Для исключения влияния этого фактора нами подвергались анализу лишь точки в области мак-

симальных оседаний. Так, в верхней части рис. 3 аналогичные графики построены для трех реперов с максимальными оседаниями, расположенных в центре мульды сдвижения (реперы 12, 13 и 14), из которых видно, что в данном случае разброс между точками минимален. Аппроксимация фактических нормированных значений оседаний земной поверхности в данных точках функцией (2) позволила установить значения эмпирических коэффициентов, которые для данного распределения составили: $k_0 = 0,50$; $k_1 = 0,51$; $k_2 = 4,48$ и $k_3 = -2,16$. График этой функции на рис. 3 показан сплошной кривой.

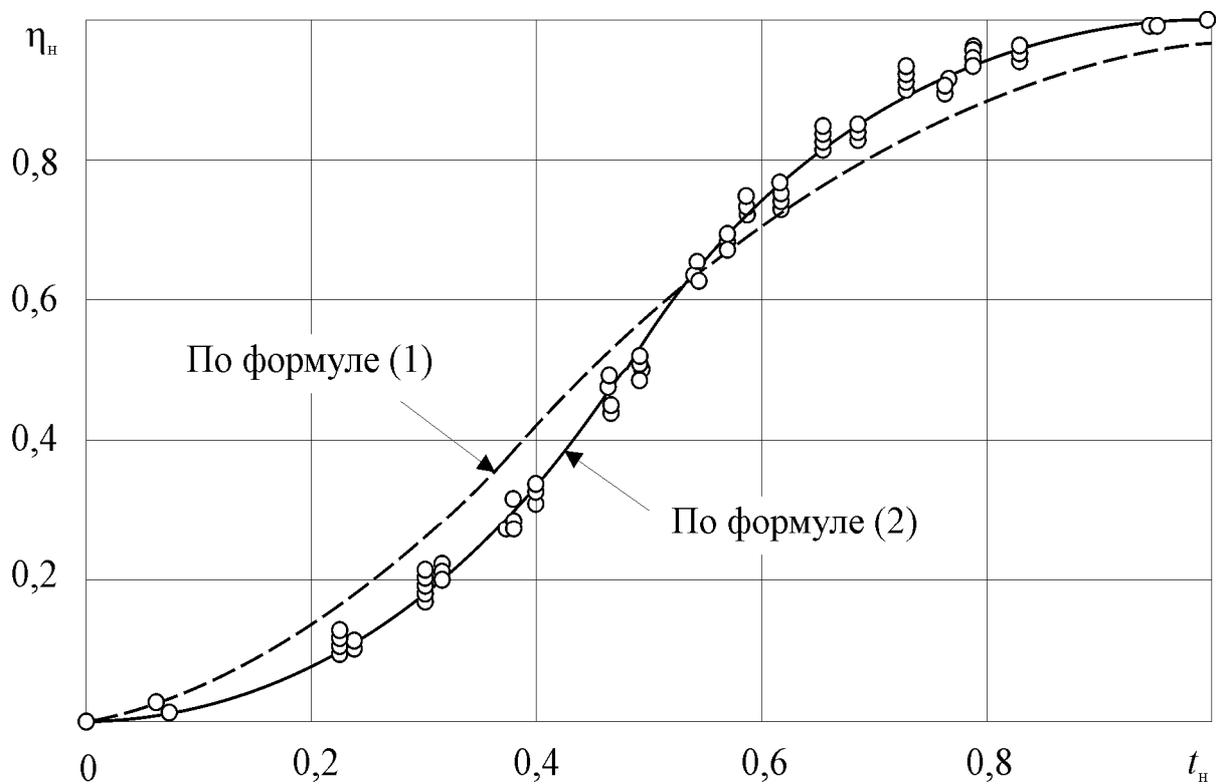


Рис. 2. Нормированные графики оседаний реперов наблюдательной станции во времени

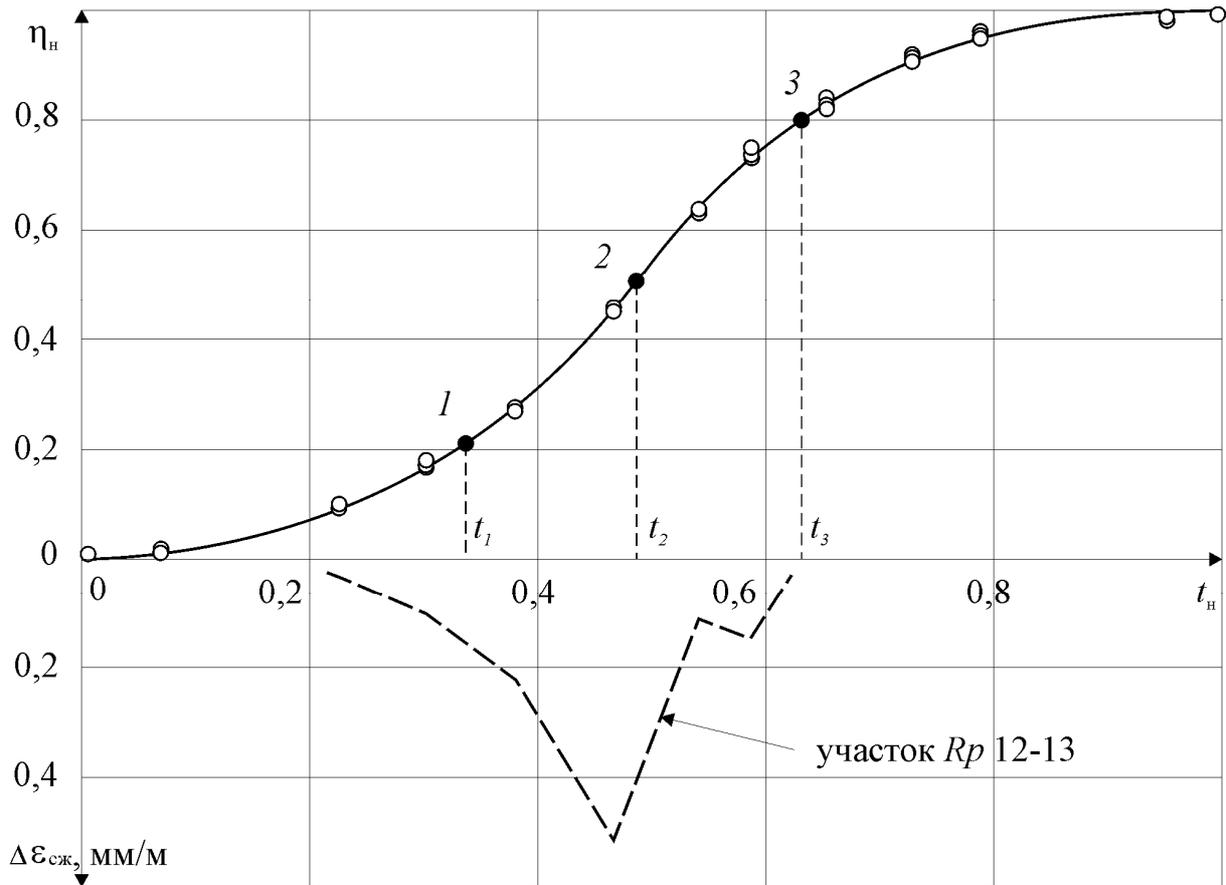


Рис. 3. Графики развития нормированных оседаний η_n реперов 12 – 14 и приращения относительных горизонтальных сжатий $\Delta \epsilon_{сж}$ участка земной поверхности между реперами 12 и 13 во времени

Рассмотрим некоторые характерные точки данной кривой, соответствующие экстремумам первых двух производных аппроксимирующей функции по аргументу $t = t_n$ (на графике рис. 3 они обозначены черными точками 1-3).

Первая производная описывает скорость изменения оседания во времени, ее максимум находится в точке 2 и соответствует точке перегиба кривой оседаний:

$$\frac{df(t)}{dt} = k_1 k_2 [1 - th^2(k_2 t + k_3)]. \quad (4)$$

Вторая производная показывает ускорение оседания рассматриваемой точки земной поверхности во времени и имеет два экстремума – положительный (точка 1) и отрицательный (точка

3), которые соответствуют точкам максимальной кривизны основной функции:

$$\frac{df^2(t)}{dt^2} = -2k_1k_2^2 \operatorname{th}(k_2t + k_3) \cdot \left[1 - \operatorname{th}^2(k_2t + k_3)\right]. \quad (5)$$

Таким образом, любая из трех описанных точек определится следующими выражениями:

$$t_2 = -\frac{k_3}{k_2}; \quad t_1 = -\frac{0,658 + k_3}{k_2}; \quad t_3 = \frac{0,658 - k_3}{k_2}. \quad (6)$$

Учитывая то, что точки 1, 2 и 3 однозначно описывают характерные моменты в развитии процесса сдвижения, определим их как характеристические.

Оценивая положение на графике точек 1 и 3 можно видеть, что они делят весь участок кривой на три приблизительно равные части, и ограничивают собой период с наибольшими скоростями оседаний земной поверхности. Так, время достижения процессом сдвижения точки 1 от своего начала в рассматриваемом случае составляет 33,5 %, точки 3 – 62,9 %, а период между этими точками составляет 29,4 % от общей его продолжительности. При этом за период от начала сдвижения до момента t_1 оседание подрабатываемой точки составляет 0,21, а до момента t_3 – 0,80 от своего максимального оседания.

Анализируя процесс сдвижения в границах участка графика между точками 1 и 3, можно выделить следующие особенности.

Во-первых, максимальная скорость оседаний земной поверхности на этом временном интервале (точка 2) превышает максимальные скорости на соседних интервалах в 1,7 раза, а средняя скорость – соответственно в 3,6 раза.

Во-вторых, в этот период происходят максимальные приращения деформации земной поверхности. Так, в нижней части графика на рис. 3 пунктиром показана кривая, описывающая характер приращения относительных горизонтальных деформаций сжатия земной поверхности на участке $R_p 12 - R_p 13$ за периоды между соседними сериями инструментальных наблюдений. Оче-

видно, что максимальные приращения этих деформаций произошли именно в этот период.

Известно, что именно при больших скоростях сдвижения земной поверхности происходят основные нарушения подрабатываемых объектов, поскольку при этом ухудшается приспособление системы "сооружение-основание" к деформационным воздействиям, приложенным к основанию [4], и интенсивность вредного воздействия подработки на данные объекты увеличивается. Кроме того, суточная скорость оседания земной поверхности является одним из основных показателей, определяющих допустимость подработки железных дорог [1]. Исходя из приведенных рассуждений, данную стадию процесса сдвижения можно рассматривать и анализировать как отдельный объект, поскольку она обладает характерными свойствами и имеет четко определенные моменты своего начала и окончания. Определим ее термином "интенсивная стадия процесса сдвижения" (в отличие от термина "активная стадия", используемом в действующем нормативном документе [1], поскольку их параметры все же несколько отличаются).

Таким образом, рассматриваемый поход позволяет аналитически определить характеристические точки, разделяющие отдельные стадии процесса сдвижения во времени. Кроме того, он обладает еще одним важным преимуществом. При анализе экспериментальных данных не всегда известны конечные значения максимального оседания η_{\max} или общей продолжительности процесса сдвижения $T_{\text{общ}}$, что исключает возможность нормирования исследуемых величин. В данном же случае, даже в случае неполных данных, описывающих лишь часть общей кривой развития сдвижения в пределах интенсивной стадии (а именно – в характеристических точках 1, 2 и 3, см. рис. 3), по исходной функции (2) и ее производным (4) и (5) можно и в ненормированном виде определить временные параметры процесса сдвижения в любой ее стадии. При этом, естественно, в каждом случае эмпирические коэффициенты исходной функции следует определять отдельно.

Исследуем зависимость параметров интенсивной стадии сдвижения от глубины разработки, которая, наряду со скоростью

подвигания очистного забоя, является одним из основных влияющих факторов. Известно, что скорость распространения процесса сдвижения в подрабатываемом породном массиве для конкретных условий имеет определенное конечное значение [5]. Следовательно, за период t , когда некоторое возмущающее действие лавы преодолеет расстояние от разрабатываемого пласта до земной поверхности, равное глубине разработки H , сама лава, двигаясь со скоростью c , переместится вдоль пласта на некоторое расстояние l . И если за точку отчета времени взять, например, момент пересечения очистным забоем вертикальной проекции рассматриваемой точки на земной поверхности, то за этот период t лава отойдет от данной проекции на расстояние:

$$l = \frac{H \cdot c}{v_{\text{ср}}} \quad (7)$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость распространения процесса сдвижения от разрабатываемого пласта к земной поверхности по вертикали.

Следовательно, в случае весьма малых значений глубины разработки или скорости подвигания очистного забоя при других равных условиях отход лавы от проекции рассматриваемой точки будет близок к нулю, а при увеличении каждой из этих величин l будет возрастать.

Для исследования влияния фактора глубины разработки привлечем результаты эксперимента по подработке вертикального шахтного ствола, проведенного в условиях шахты "Глубокая" [5, 6]. Как было показано выше, начало активной стадии сдвижения традиционно привязывают к моменту T_0 прохода очистного забоя под рассматриваемой точкой земной поверхности. По аналогии сопоставим моменты достижения процессом сдвижения реперов определенных нами характеристических точек с моментом T_0 . На рис. 4 показаны графики развития оседаний во времени некоторых реперов наблюдательной станции в стволе № 1, расположенных на различных глубинах, которые получены путем аппроксимации фактических данных функцией гиперболического тангенса (2).

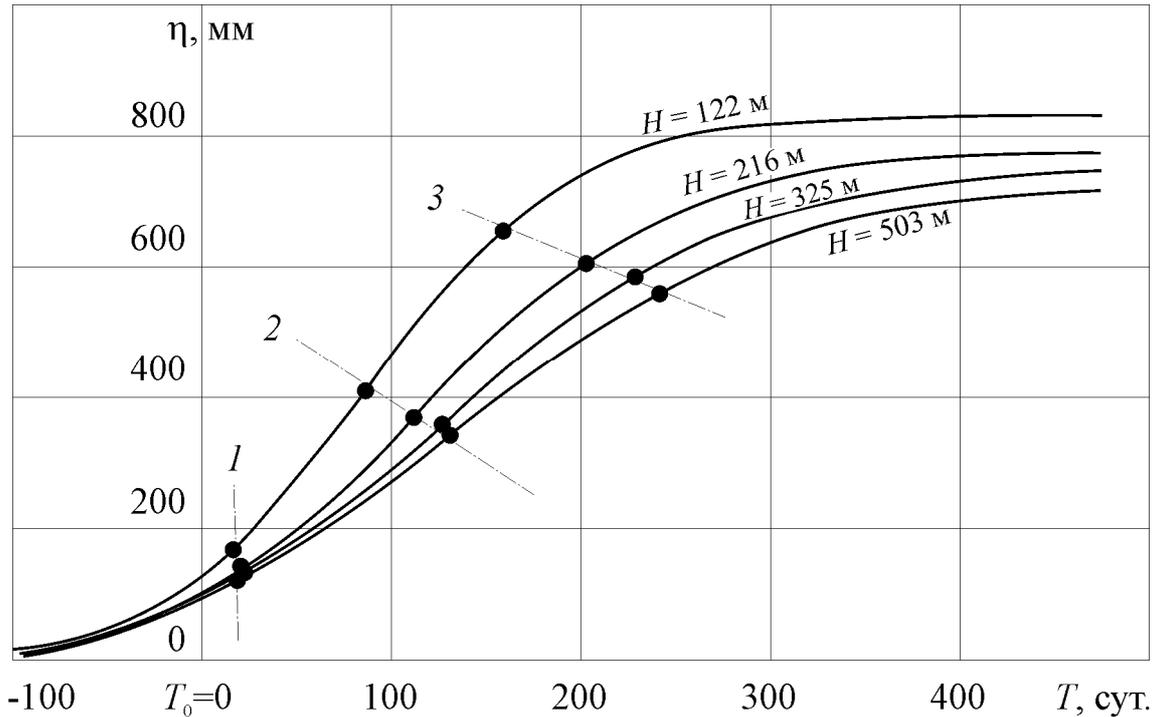


Рис. 4. Графики оседаний реперов, расположенных на разных глубинах, во времени

Анализ графиков позволил заключить следующее:

- при малых глубинах подработки процесс сдвижения протекал более интенсивно, чем при больших, а оседания достигли больших значений;

- между моментами начала интенсивной стадии процесса сдвижения (точки 1) реперов, расположенных на разных глубинах, имели место небольшие временные интервалы: разница между началом этой стадии на нижнем и верхнем реперах станции составила всего четверо суток;

- моменты максимальных скоростей оседания (точки 2), а также моменты окончания интенсивной стадии сдвижения (точки 3) реперов, расположенных на разных глубинах, наступали в разное время – с увеличением глубины подработки их наступление все более замедлялось; так, разница между достижением точки 2 для нижнего и верхнего реперов станции составила 44 суток, а точки 3 – 83 суток.

Введем следующие условные обозначения:

$$t_{01} = T_1 - T_0; \quad t_{02} = T_2 - T_0; \quad t_{03} = T_3 - T_0, \quad (8)$$

где t_{01} , t_{02} , t_{03} – периоды (в сутках) между датой прохода очистного забоя под рассматриваемой точкой земной поверхности (T_0) и датами T_1 , T_2 и T_3 , соответствующими моментам развития процесса сдвижения данной точки в характеристических точках 1, 2 и 3 (см. рис. 3).

Зная скорость подвигания очистного забоя, по этим периодам можно определить место положения лавы относительно проекции на пласт точки земной поверхности, подработка которой рассматривается:

$$l_{01} = c \cdot t_{01}; \quad l_{02} = c \cdot t_{02}; \quad l_{03} = c \cdot t_{03}, \quad (9)$$

где c – скорость подвигания очистного забоя, м/сут.

Для дальнейшего анализа введем понятие угла характеристической точки τ , под которым будем понимать угол, образованный на вертикальном разрезе по простиранию пласта между горизонталью и прямой, соединяющей грудь очистного забоя с точкой земной поверхности, в один из моментов, определяемых характеристическими точками 1, 2 или 3:

$$\tau_i = \arctg\left(\frac{H}{l_{0i}}\right). \quad (10)$$

На рис. 5 эти углы обозначены соответственно как τ_1 , τ_2 и τ_3 , а на рис. 6 приведены графики изменения этих углов в зависимости от глубины подработки.

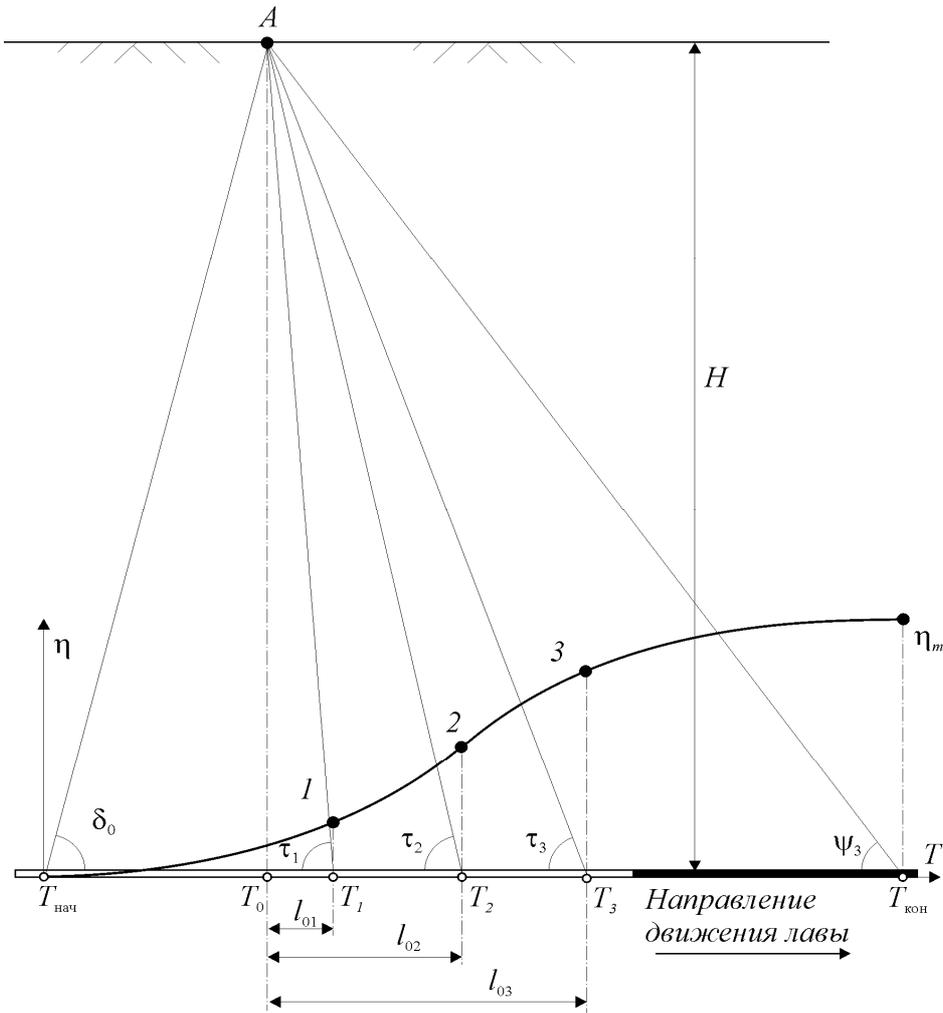


Рис. 5. Схема подработки точки А земной поверхности

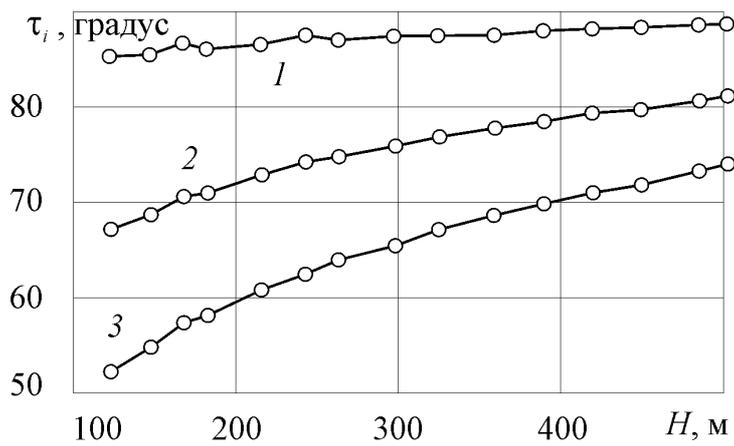


Рис. 6. Графики изменения углов τ в зависимости от глубины подработки

Из этих графиков видно, что наиболее устойчивым к изменению глубины является угол τ_1 , определяющий местонахождение лавы относительно подрабатываемой точки в момент начала интенсивной стадии ее сдвижения, что дает основание использовать эту величину в качестве опорной для определения других временных параметров процесса сдвижения. В то же время, заметно, что даже в интервале рассматриваемых глубин подработки угол τ_1 не постоянен, а имеет тенденцию к увеличению (рис. 7 а).

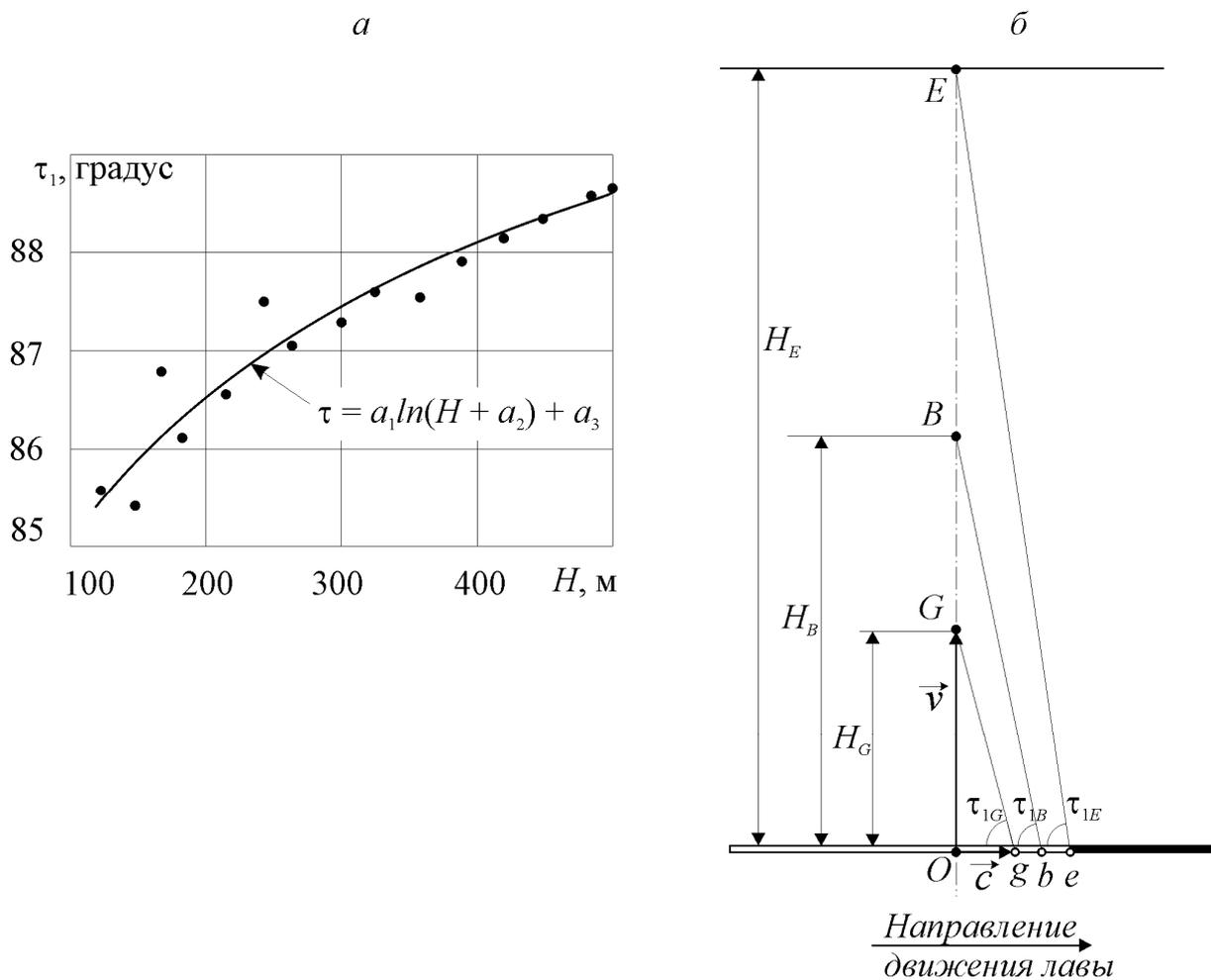


Рис. 7. Характер изменения угла τ_1 с глубиной

Такое изменение угла τ_1 с глубиной объясняется тем, что распространение процесса сдвижения по вертикали от пласта к земной поверхности при движущемся очистном забое происходит с ускорением, а средняя скорость передачи возмущающего

импульса, соответствующего началу его интенсивной стадии (точка I на рис. 5), значительно выше скорости подвигания очистного забоя [7]. Вследствие этого при равных отрезках $gb = be$, проходимых лавой на разрезе по простиранию пласта за равные промежутки времени (рис. 7 б), момент начала интенсивной стадии распространяется вверх по вертикальной оси неравномерно, т.е. $GB < BE$, а, следовательно, и углы τ_1 для подрабатываемых точек G , B и E , расположенных на одной вертикали, также не равны между собой ($\tau_{1G} < \tau_{1B} < \tau_{1E}$), причем их изменение носит нелинейный характер. Анализ показал, что изменение угла τ_1 в зависимости от глубины подработки хорошо описывается логарифмической функцией (см. рис. 7 а), которая для рассматриваемых условий имеет следующий вид:

$$\tau_1 = 2,36 \ln(H + 19) + 73,8, \text{ градус}, \quad (11)$$

где H – средняя глубина подработки, м.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены следующие выводы.

1. Изменение во времени максимального оседания земной поверхности над движущимся очистным забоем может быть описано функцией гиперболического тангенса.

2. Внутри всего периода процесса сдвижения можно выделить интенсивную стадию развития, составляющую приблизительно его треть, во время которой происходят максимальные приращения деформаций земной поверхности, что наиболее опасно для подрабатываемых объектов. Начало и окончание этой стадии совпадают с точками локальных экстремумов второй производной по времени аппроксимирующей функции, определяющих соответственно моменты максимального ускорения и максимального замедления оседания земной поверхности.

3. Установлено, что момент начала интенсивной стадии развития процесса сдвижения зависит от глубины подработки. На основе анализа экспериментальных данных определены вид и параметры этой зависимости для рассматриваемых условий.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.00159226.001-2003.– [Чинний 2004-01-01]. – Офіц. вид.– Донецьк: УкрНДМІ, 2003. – 128 с.
2. Гавриленко Ю.Н. Математическое описание динамики процесса сдвижения на угольных шахтах Донбасса / Гавриленко Ю.Н. // International Society for Mine Surveying. XIII International Congress. Budapest, Hungary, 24-28 September. – 2007. – Report 032 (6 p.).
3. Кулибаба С.Б. Опыт подработки наклонных стволов / Кулибаба С.Б. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України: зб. наук. пр. – Донецьк, 2010. – № 6. – С. 67 - 72.
4. Муллер Р.А. Особенности многократной подработки зданий и сооружений в Донецком бассейне / Муллер Р.А., Шнеер В.Р. // Изучение и прогноз сдвижений и деформаций горных пород, гидромеханических процессов при разработке месторождений подземным и открытым способами: Сб. науч. тр. – ВНИМИ. – Л., 1991. – С. 78 - 84.
5. Кулибаба С.Б. Исследование развития процесса сдвижения в массиве горных пород при движущемся очистном забое / Кулибаба С.Б. // Труды Междунар. науч.-техн. конф. "Геоинформатика, геодезия, маркшейдерия". – Донецк: ДонНТУ. – 2003. – С. 51 - 57.
6. Кулибаба С.Б. Выемка предохранительного целика под действующим вертикальным стволом / Кулибаба С.Б., Южанин И.А., Колдунов И.А., Голдин С.В. // Уголь Украины. – 1991. – № 8. – С. 31 - 33.
7. Кулибаба С.Б. Исследование скорости распространения процесса сдвижения в подрабатываемом массиве горных пород / Кулибаба С.Б. // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2004. – № 1. – С. 78 - 82.