**УДК 622.834**

**А.И. Быкадоров, П. М. Ларичкин, С.В. Свирко**

# СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОМЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ЗАБОЯМИ ШАХТ КУЗБАССА

Сведения о сдвижении подрабатываемой земной поверхности и массива горных пород, накопленные в горной практике России и за рубежом, основаны на инструментальных наблюдениях и лабораторных исследованиях на моделях. Уже в начале 20-го столетия маркшейдеры горных предприятий во избежание нанесения серьезного ущерба зданиям, сооружениям, путям сообщения, сельскому хозяйству и т.д. от проводимых горных работ стали закладывать наблюдательные станции и вести инструментальные наблюдения за сдвижениями земной поверхности [2, 3].

Анализ и обобщение материалов проводимых наблюдений позволили решить многие вопросы, связанные с обеспечением безопасной подработки зданий, сооружений и природных объектов на угольных месторождениях. В области применения теоретических методов к расчетам сдвижений горных пород большой вклад внесли такие ученые как С.Г. Авершин, А.Г. Акимов, Ж.С. Ержанов, В.Н. Земисев, М.А. Иофис, Д.А. Казаковский, С.П. Колбенков, А.С. Космодамианский, С.Г. Лехницкий, Р.А. Муллер, Н.И. Мусхелишвили, Г.Н. Савин и др.

Проведенные теоретические исследования и обобщения экспериментальных данных легли в основу нормативного документа по расчету сдвижений и деформаций подрабатываемой земной поверхности при разработке угольных месторождений - «Правил охраны…» [1], в которых исходные данные для выполнения необходимых оценок представлены в виде усредненных показателей по крупным угольным бассейнам страны.

Методика «Правил…» применима для различных горно-геологических условий при закончившемся процессе сдвижения и не учитывает фактора времени (вернее – движения очистного забоя), а используемые для оценок усредненные исходные данные получены при скоростях подвигания очистного забоя до 3÷5м/сут, что в 2÷4 раза меньше скоростей подвигания актуальных в настоящее время. Отсутствуют методические положения расчета скорости изменения горизонтальных сдвижений и деформаций земной по-

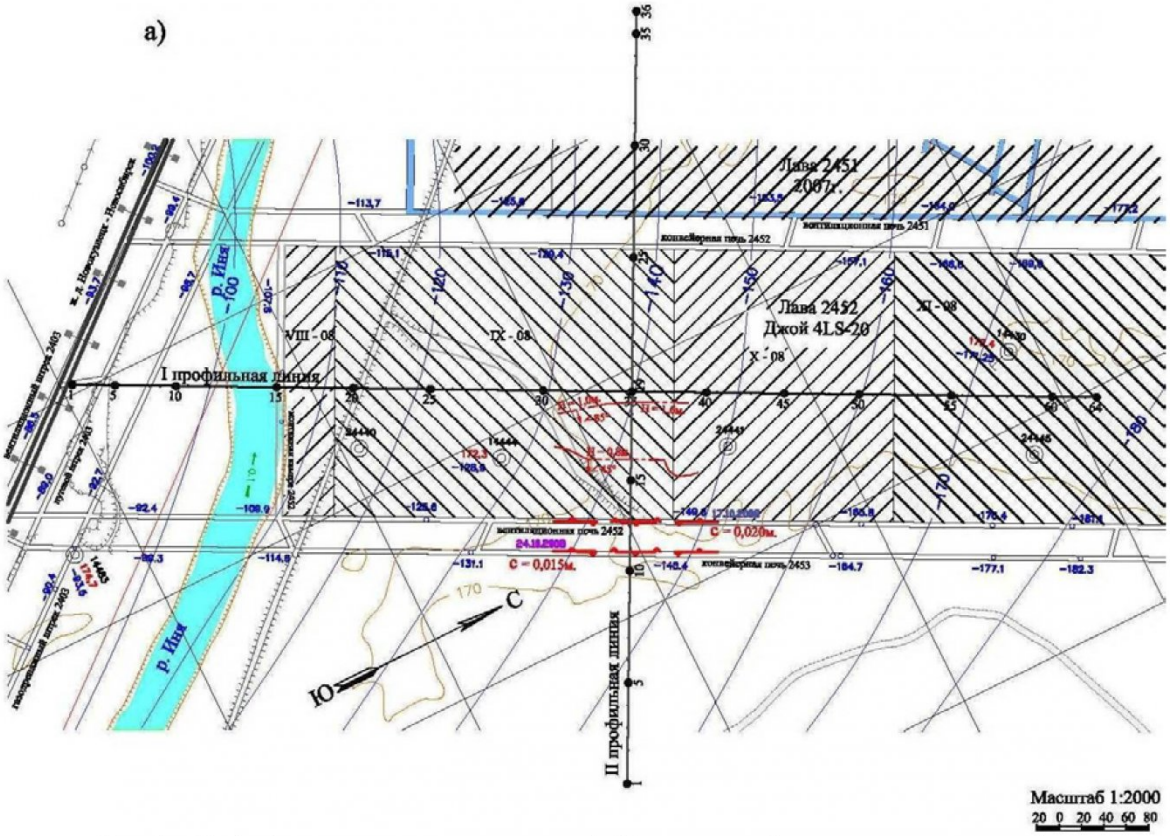


*Рис. 1 – Наблюдательная станция по лаве 2452 на совмещённом плане горных работ на шахте им. Кирова*

верхности, знание величины которых необходимо при разработке мер защиты протяженных объектов и сооружений на подрабатываемых территориях.

Вопросы изучения сдвижений и деформаций горного массива и земной поверхности под влиянием горных работ при высоких скоростях подвигания забоев и установление зависимости их развития во времени становятся весьма важными с вводом в эксплуатацию высокопроизводительных очистных забоев. В рамках развития теоретических представлений о динамике сдвижений и деформаций в новых условиях в разное время на шахтах Кузбасса были заложены наблюдательные станции с проведением на них серий частотных наблюдений. Обобщение полученных экспериментальных данных в процессе движения очистных забоев от монтажной камеры до демонтажной камеры с повышенными скоростями было начато А.С. Ягуновым [4].

В данной статье рассматривается частный вопрос – динамика горизонтальных сдвижений земной поверхности, как продолжение исследований А.С. Ягунова. Исследования проведены по наблюдательным станциям на шахтах: «Грамотеинская», лава 631, пл. Сычевский; «Котинская», лавы 5204 и 5205, пл. 52; им. Кирова, лавы 2446 и 2452, пл. Болдыревский; им. Дзержинского, пл. Двойной; «Карагайлинская», пл. Сергеевский; «Распадская», пл. 6-6а; «Березовская -1», лава 164, пл. XXII и другие (всего 18 наблюдательных станций). Характерные сдвижения и деформации поверхности и методика обработки наблюдений показаны на примерах анализа данных наблюдательных станций на шахтах «Грамотеинская», «Котинская» и им. Кирова, лава 2452 (рис. 1). Пласт Болдыревский вынимаемой мощностью 2,35 м и углом падения 6 градусов отрабатывался на средней глубине 314 м высокопроизводительным комплексом Джой 4LS-20 со скоростями подвигания очистного забоя $c$ = (4,8 – 12) м/сут. Размеры лавы вкрест простирания $D_1$ = 250 м и по простиранию $D_2$ > 600 м.

Исследованиями [4] установлено и подтверждено авторами статьи, что при отходе очистного забоя от монтажной камеры на расстояние $D_{2x} = 0{,}3H_{CP}$, где $H_{CP}$ – средняя глубина разработки (м), на поверхности начинает формироваться зона сдвижений (микромульда). На рис.2*а* показано развитие зоны сдвижения на различные моменты времени с начальным положением максимума оседаний на репере $R_{22}$ (I профильная линия по простиранию лавы 2452 шахты им. Кирова). Отсчет параметров сдвижения ведется со стороны монтажной камеры, при этом первые значимые величины оседаний зафиксированы на 10 репере. При дальнейшем подвигании очистного забоя микромульда растет в размерах, оседания земной поверхности увеличиваются, а положение точки максимума оседаний сдвигается в сторону демонтажной камеры. Величина максимума оседаний достигает своего предельного значения при

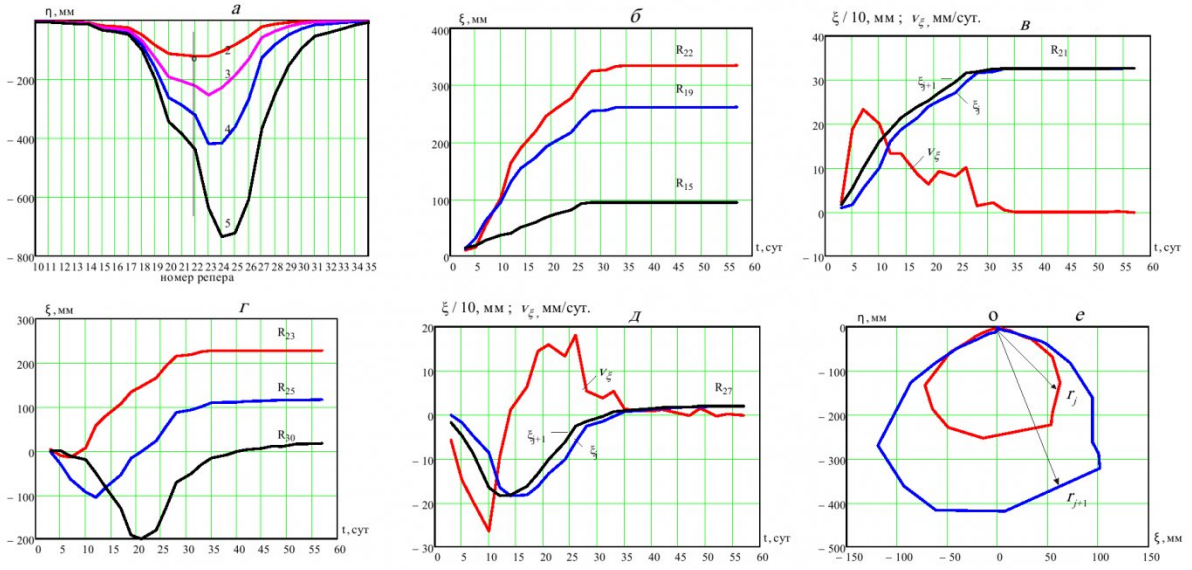


*Рис. 2 – Вертикальные и горизонтальные составляющие сдвижений земной поверхности в динамической микромульде:а - развитие оседаний при отходе очистного забоя от монтажной камеры; б - пример горизонтальных сдвижений точек поверхности в развивающейся микромульде, расположенных со стороны монтажной камеры до начального положения максимального оседания микромульды;в - характерные горизонтальные сдвижения точек полумульды со стороны монтажной камеры и их скорость сдвижения во времени развития микромульды;г - пример горизонтальных сдвижений точек поверхности в развивающейся микромульде, расположенных со стороны демонтажной камеры после начального положения максимального оседания микромульды;д - характерные горизонтальные сдвижения точек полумульды со стороны демонтажной камеры и их скорость сдвижения во времени развития микромульды.*

положении очистного забоя $D_{2x} = 1{,}6H_{CP}$ (развитый процесс сдвижения). При положениях очистного забоя $D_{2x} > 1{,}6H_{CP}$ в динамической мульде образуется «плоское дно», размеры полумульды сдвижений и величины оседаний ее точек поверхности со стороны монтажной камеры (полумульда позади забоя длиной $L_{ПЗ}$) практически не изменяются, а полумульда со стороны демонтажной камеры (полумульда впереди забоя длиной $L_{ВЗ}$) движется вместе с очистным забоем.

Если оседания всех точек поверхности в микромульде растут по мере подвигания очистного забоя, то характер горизонтальных сдвижений этих точек зависит от их положения по линии простирания лавы. Горизонтальные сдвижения всех точек поверхности микромульды от ее начала до $R_{22}$ растут с течением времени в сторону демонтажной камеры до своих максимальных значений, что показано на рис. 2*б*.

Характерное распределение скорости горизонтальных сдвижений этих точек поверхности приведено на рис. 2*в*.

Единичные скорости горизонтальных сдвижений $v_\xi$ по каждой профильной линии определялись по формуле (1):

$$v_{\xi i,j} = \frac{\xi_{i,j+1} - \xi_{i,j}}{t_j} \qquad (1)$$

где $\xi_{i,j}$ – единичные горизонтальные сдвижения в каждой профильной линии, мм;

$i$ – номер репера профильной линии;

$j$ – номер произведенного наблюдения;

$t_j$ – интервал времени между $j$+1 и $j$ – м наблюдениями, сут.

Точки поверхности по простиранию лавы, расположенные со стороны демонтажной камеры после точки начального максимального оседания микромульды ($R_{23}$ и далее), имеют совсем другой характер горизонтальных сдвижений (см. рис. 2*г*). Эти точки сначала сдвигаются в сторону монтажной камеры до определенного максимума, а затем начинают сдвигаться в сторону демонтажной камеры. При этом скорость горизонтальных сдвижений имеет два экстремума противоположных знаков (см. рис. 2*д*).

Характер сдвижения точек динамической мульды в координатной плоскости вертикальных и горизонтальных сдвижений $\eta 0\xi$ показан на рис.2*е*.

Вектор $r_j$, проведенный из начала координат

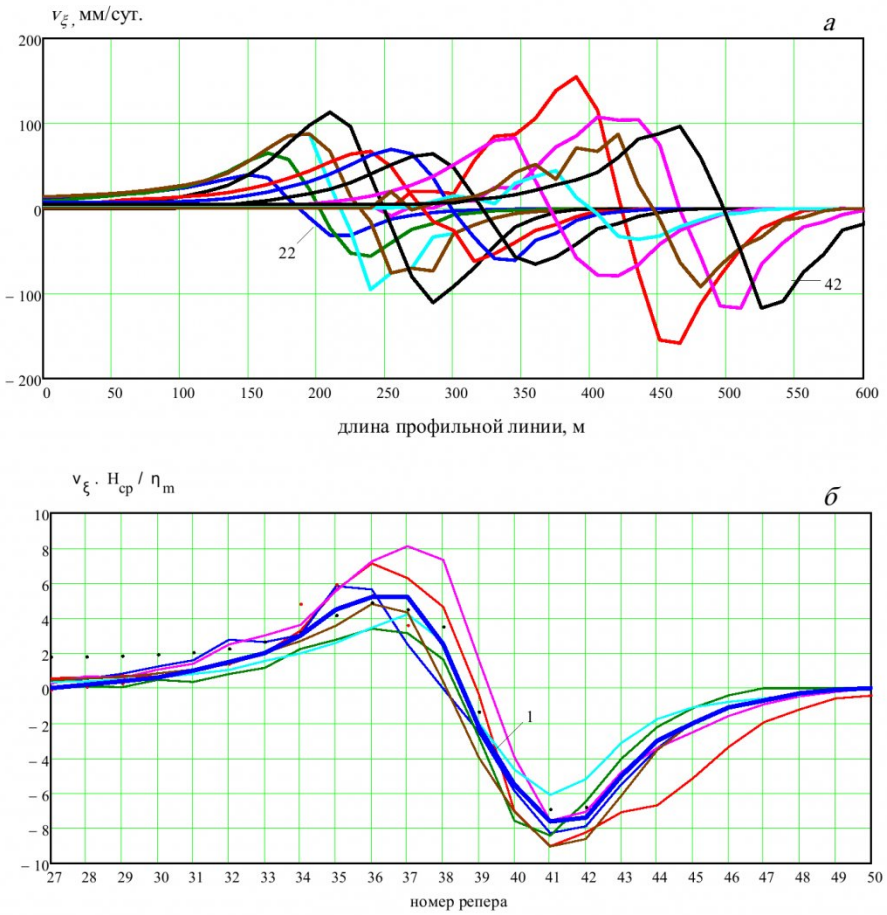


*Рис. 3 – Типичные единичные скорости горизонтальных сдвижений: а - единичные скорости горизонтальных сдвижений по простиранию лавы 631 на ш. «Грамотеинская»; б - совмещенные единичные скорости горизонтальных сдвижений в профильной линии по простиранию лавы 5205 на ш. «Котинская».*

последовательно в каждую точку динамической мульды в определенный момент времени $t_j$, описывает замкнутую кривую, похожую на эллипс. При положении забоя в момент времени $t_{j+1}$ одни точки мульды сдвигаются в сторону монтажной камеры, другие – в сторону демонтажной камеры. При этом распределение скоростей горизонтальных сдвижений по длине профильных линий в определенный момент времени имеет вид, приведенный на рис. 3*а*.

Максимальная и минимальная величина этих скоростей зависит в большой степени от скорости подвигания очистного забоя (*c*).

Для установления характера этой зависимости наблюдения по множеству профильных линий по простиранию лав рассматривались как единая статистическая совокупность, в которой учет разной мощности пластов $m$ и глубины разработки $H_{CP}$ произведен умножением *max* и *min* скорости горизонтальных сдвижений на кратность максимальных оседаний $k_\eta = \dfrac{H_{CP}}{\eta_m}$, где $\eta_m$ – максимальное оседание земной поверхности при развитом процессе сдвижений, м.

Уравнения линейной регрессии при развитом процессе сдвижений, когда $D_{2x} \geq 1{,}6H_{CP}$, имеют вид:

$$v_{\xi \max ВЗ} \cdot k_\eta = 0{,}878c - 0{,}03;$$
$$v_{\xi \min ВЗ} \cdot k_\eta = -0{,}649c - 1{,}24 \qquad (2)$$

В микромульде, когда $D_{2x} < 1{,}6H_{CP}$, аналогичные зависимости имеют вид:

$$v_{\xi \max ММ} \cdot k_\eta = 0{,}32c + 2{,}12;$$
$$v_{\xi \min ММ} \cdot k_\eta = -0{,}35c - 1{,}73 \qquad (3)$$

Установление типовых функций распределения скорости горизонтальных сдвижений по динамической мульде выполнено по следующей методике. Наблюдаемые единичные скорости по каждой профильной линии приводились к какому либо одному реперу (см. рис. 3*б*).

Графоаналитическим методом определялась средняя линия. По найденным средним (кривая 1 на рис. 3*б*) установлены типовые функции распределения скоростей горизонтальных сдвижений по длинам нормированных (приведенных к интервалу [0;1]) микромульды $D_{2x}$ и полумульды $L_{ВЗ}$ со стороны демонтажной камеры при развитом процессе сдвижений.

Численные значения функций распределения скорости горизонтальных сдвижений $Sv_{\xi ММ}$ в микромульде для точек $z = l_{2x}/D_{2x}$ и $Sv_{\xi ВЗ}$ в полумульде впереди забоя для точек $z = l_{ВЗ}/D_{ВЗ}$ приведены в табл. 1, где $l_{2x}$ – текущее значение положения очистного забоя при $D_{2x} < 1{,}6H_{CP}$; $l_{ВЗ}$ – текущее значение полумульды впереди забоя.

Таблица 1. Функции распределения скорости горизонтальных сдвижений по простиранию лавы

.

| В микромульде | | В полумульде впереди забоя | |
|---|---|---|---|
| $z = l_{2x}/D_{2x}$ | $Sv_{\xi ММ}$ | $z = l_{ВЗ}/D_{ВЗ}$ | $Sv_{\xi ВЗ}$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,05 | 0,1 | 0,05 | 0,2 |
| 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,5 |
| 0,15 | 0,7 | 0,15 | 0,9 |
| 0,2 | 1,1 | 0,2 | 1,5 |
| 0,25 | 1,9 | 0,25 | 2,3 |
| 0,3 | 2,8 | 0,3 | 3,4 |
| 0,35 | 4 | 0,35 | 5,2 |
| 0,4 | 5 | 0,4 | 6,5 |
| 0,45 | 4 | 0,45 | 5,4 |
| 0,5 | 0 | 0,5 | 0 |
| 0,55 | -3,2 | 0,55 | -4 |
| 0,6 | -5 | 0,6 | -6,5 |
| 0,65 | -4 | 0,65 | -6 |
| 0,7 | -2,2 | 0,7 | -4 |
| 0,75 | -1,1 | 0,75 | -2,2 |
| 0,8 | -0,5 | 0,8 | -1,1 |
| 0,85 | -0,3 | 0,85 | -0,6 |
| 0,9 | -0,2 | 0,9 | -0,4 |
| 0,95 | -0,1 | 0,95 | -0,2 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |

Скорость горизонтальных сдвижений земной поверхности в главном сечении по простиранию лавы рассчитывается по формулам:

- в микромульде при $D_{2x} < 1{,}6H_{CP}$:

$$v_{\xi ММ} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot Sv_{\xi ММ} \cdot (0{,}32 \cdot c + 2{,}12)$$

при $z \leq 0{,}5H_{CP}$;

$$v_{\xi ММ} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot Sv_{\xi ММ} \cdot (-0{,}35 \cdot c - 1{,}73)$$

при $z > 0{,}5H_{CP}$ (4)

- при развитом процессе сдвижений при $D_{2x} \geq 1{,}6H_{CP}$:

$$v_{\xi ВЗ} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot Sv_{\xi ВЗ} \cdot (0{,}88 \cdot c - 0{,}03)$$

при $z \leq 0{,}5H_{CP}$;

$$v_{\xi ВЗ} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot Sv_{\xi ВЗ} \cdot (-0{,}65 \cdot c - 1{,}24)$$

при $z > 0{,}5H_{CP}$ (5)

Пример характерных сдвижений земной поверхности вкрест простирания лав во времени приведен на рис. 4*а*. Начало отсчета со стороны падения лавы. При монотонном оседании точки профильных линий в полумульдах по падению сдвигаются в сторону восстания (положительная сторона оси 0ξ), а в полумульде по восстанию – в

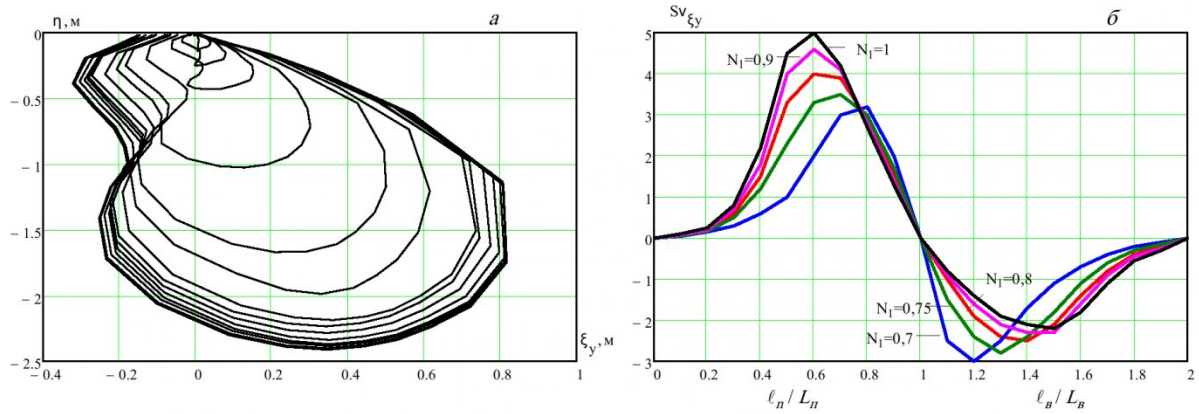


*Рис. 4 – Характерные сдвижения земной поверхности вкрест простирания лав во времени и функции распределения скоростей горизонтальных сдвижений по полумульдам:*
*а - развитие вертикальных и горизонтальных составляющих сдвижений точек профильной линий вкрест простирания лавы 5204 при прохождении под ними очистного забоя на ш. «Котинская»;*
*б - функции распределения скорости горизонтальных сдвижений поверхности в главном сечении вкрест простирания лавы в полумульдах по падению $L_n$ и восстанию $L_в$ для разной степени подработанности массива.*

сторону падения лав. В полумульдах по падению принято положительное значение скоростей горизонтальных сдвижений, в полумульдах по восстанию – отрицательное. Сначала скорости сдвижений в полумульдах возрастают, затем снижаются до нулевых значений.

Установлены закономерности изменения максимальных значений скорости горизонтальных сдвижений в полумульдах по падению и восстанию в зависимости от положения $d_x$ очистного забоя лавы под профильной линией, которые имеют вид:

- в полумульде по падению

$$v_{\xi y\max} = 60 \cdot \left(\frac{d_x}{H_{CP}}\right)^2 \cdot e^{-12\cdot\left(\frac{d_x}{H_{CP}}-0{,}2\right)^2};$$

- в полумульде по восстанию

$$v_{\xi y\min} = -680 \cdot \left(\frac{d_x}{H_{CP}}\right)^2 \cdot e^{-2{,}8\cdot\left(\frac{d_x}{H_{CP}}+0{,}75\right)^2} \quad (6)$$

Для установления распределения скорости горизонтальных сдвижений поверхности в полумульдах по падению и восстанию произведено усреднение единичных скоростей сдвижений по каждой профильной линии по такой же методике, как и для профильных линий по простиранию лав. По усредненным значениям графоаналитическим методом установлены типовые функции распределения скоростей горизонтальных сдвижений поверхности в главном сечении вкрест простирания лавы для различной степени подработанности массива, оцениваемой коэффициентом $N_1$ (см. рис. 4*б* и табл. 2).

Скорость горизонтальных сдвижений земной поверхности в главном сечении вкрест простира-

Таблица 2 - Функции распределения скорости горизонтальных сдвижений вкрест простирания лавы.

| $Sv_{\xi yП}$ в полумульде по падению | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $z = l_П / L_П$ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| $N_1 = 1$ | 0 | 0,1 | 0,25 | 0,8 | 2,2 | 4,5 | 5,0 | 4,2 | 2,7 | 1,3 | 0 |
| $N_1 = 0{,}9$ | 0 | 0,08 | 0,2 | 0,7 | 1,8 | 4,0 | 4,6 | 4,1 | 2,8 | 1,4 | 0 |
| $N_1 = 0{,}8$ | 0 | 0,07 | 0,19 | 0,6 | 1,5 | 3,3 | 4,0 | 3,9 | 2,9 | 1,5 | 0 |
| $N_1 = 0{,}75$ | 0 | 0,06 | 0,17 | 0,5 | 1,2 | 2,3 | 3,3 | 3,5 | 3,0 | 1,7 | 0 |
| $N_1 = 0{,}7$ | 0 | 0,05 | 0,15 | 0,3 | 0,6 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 3,2 | 2,0 | 0 |
| $Sv_{\xi yВ}$ в полумульде по восстанию | | | | | | | | | | | |
| $z = l_В / L_В$ | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2 |
| $N_1 = 1$ | 0 | -0,8 | -1,4 | -1,9 | -2,1 | -2,2 | -1,8 | -1,1 | -0,55 | -0,3 | 0 |
| $N_1 = 0{,}9$ | 0 | -0,9 | -1,6 | -2,1 | -2,3 | -2,3 | -1,6 | -0,9 | -0,45 | -0,25 | 0 |
| $N_1 = 0{,}8$ | 0 | -1,0 | -1,9 | -2,4 | -2,5 | -2,1 | -1,4 | -0,8 | -0,4 | -0,2 | 0 |
| $N_1 = 0{,}75$ | 0 | -1,5 | -2,4 | -2,8 | -2,4 | -1,8 | -1,1 | -0,6 | -0,3 | -0,15 | 0 |
| $N_1 = 0{,}7$ | 0 | -2,5 | -3,0 | -2,5 | -1,7 | -1,1 | -0,7 | -0,4 | -0,2 | -0,1 | 0 |

ния лавы рассчитывается по формулам:

- в полумульде по падению

$$v_{\xi yП} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot Sv_{\xi П} \cdot v_{\xi y\max};$$

- в полумульде по восстанию

$$v_{\xi yB} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot Sv_{\xi B} \cdot v_{\xi y\min} \qquad (7)$$

где $v_{\xi y\max}$ и $v_{\xi y\min}$ рассчитываются по формулам (6) в зависимости от положения очистного забоя под профильной линией.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

- динамическая микромульда сдвижений на подрабатываемой земной поверхности начинает формироваться при отходе высокомеханизированного очистного забоя на расстояние $D_{2x} = 0{,}3H_{CP}$ от монтажной камеры и достигает полных сдвижений на расстоянии $D_{2x} = 1{,}6H_{CP}$. При этом вертикальная составляющая сдвижений каждой точки микромульды монотонно возрастает, а максимальная их величина достигает 85 – 90% от окончательных оседаний в главном сечении. Характер изменения горизонтальной составляющей сдвижений каждой точки поверхности зависит от ее положения в микромульде;
- вектор скорости изменения горизонтальных сдвижений точек поверхности, расположенных между монтажной камерой и начальной точкой максимальных оседаний формирующейся микромульды, направлен в сторону демонтажной камеры. Остальные точки мульды сдвижений могут менять первоначальный вектор скорости горизонтальных сдвижений на противоположный в процессе движения очистного забоя лавы;
- абсолютные величины максимальных скоростей горизонтальных сдвижений в главном сечении по простиранию лавы зависят от скорости подвигания очистного забоя и могут быть рассчитаны по формулам (2) и (3);
- скорость горизонтальных сдвижений земной поверхности в точках главного сечения по простиранию лавы в микромульде рассчитывается по формулам (4), а в полумульде впереди забоя при развитом процессе сдвижений по формулам (5) с использованием табл. 1;
- скорость горизонтальных сдвижений земной поверхности в точках главного сечения вкрест простирания лавы в полумульдах по падению и восстанию рассчитываются по формулам (7) с использованием табл. 2 с учетом коэффициента подработанности массива $N_1$;
- разработанный расчет ожидаемых скоростей изменения горизонтальных сдвижений земной поверхности может быть использован в качестве дополнения к «Правилам охраны …» [1] при разработке мер защиты подрабатываемых протяженных объектов и сооружений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – СПб.: ВНИМИ, 1998. – 290 с.

2. *Кульбах О.Л.* Первые итоги систематических наблюдений сдвижений дневной поверхности под влиянием каменноугольных разработок в Донбассе / Кульбах О.Л., Коротков М.В. //Тр. маркшейдерской комиссии – М.: Горгеолнефтеиздат, 1934. – Вып. 2. – С. 114-140.

3. *Кратч Г.* Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. – М.: Недра, 1978. – 494 с.

4. *Ягунов А.С.* Динамика деформаций в подрабатываемом горном массиве /Минэнерго РФ, НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ, Сибирский филиал. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. – 239 с.

Авторы статьи

Быкадоров
Алексей Иванович
канд. техн. наук,
генеральный директор ООО
«Сибирский институт геотехнических исследований» (ООО «СИГИ»),
г. Прокопьевск
Email: aibykadorov@mail.ru

Ларичкин
Петр Михайлович
канд. техн. наук
зав.отделом анализа и методической подготовки ООО «Сибирский институт геотехнических исследований» (ООО «СИГИ»),
г.Прокопьевск
Email: larichkin.petr@yandex.ru

Свирко
Сергей Владимирович
аспирант каф. разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом КузГТУ,
Email: svirko@ngs.ru