

УДК 622.537.8

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ СДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Коломиец В.А. (ОП ш/у «Южнодонбасское №1» ГП  
Донецкуголь, г. Угледар, Украина),

Назимко В.В., Сажнев В.П. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*На основі чисельного стохастичного моделювання встановлено, що розкид випадкових відхилень осідань та деформацій земної поверхні під впливом підробки довгими очистними вибоями максимальний над серединою вироблених просторів та ціликів.*

*Stochastic numerical simulation has indicated that deviation of subsidence and surface deformation are maximum over the gobs and pillars, decrease over the ribs and are minimum over the boundaries of troughs.*

### Введение

Отработка подземных месторождений угля сопровождается сдвижением земной поверхности и нарушением целостности наземных объектов и сооружений. Прогноз ожидаемых показателей сдвижений продолжает оставаться весьма актуальной задачей в связи с рядом нерешенных проблем. Одна из таких проблем связана с тем, что фактические распределения показателей сдвижений земной поверхности при ее подработке длинными очистными забоями существенно отличаются от ожидаемых, которые определяются по какой-либо методике. При разработке угольных месторождений Украины для расчета ожидаемых сдвижений и деформаций поверхности применяют Правила... [1], методология которых близка к аналогичному документу Германии. На шахтах Великобритании используют эмпирическую методику расчета ожидаемых показателей сдвижений, которая получена на основании статистической

обработки большой базы данных натуральных наблюдений [2]. На шахтах США и Австралии часто применяют несколько конкурирующих методик, которые основаны на той, или иной модели деформированной среды (методы конечных, граничных или дискретных элементов, методы конечных разностей, эмпирические методы) [3]. Главная черта всех методов расчета ожидаемых величин сдвижений и деформаций заключается в том, что определяются *детерминированные* значения показателей сдвижений. Затем даются оценки возможного отклонения или разброса расчетных величин от фактических.

В Правилах.. [1] естественный разброс учитывается коэффициентами перегрузки, изменяющимися от 1,2 до 1,8. Эти коэффициенты получены путем учета среднеквадратического отклонения  $m$  расчетных величин от фактически измеренных по большим выборкам доступных экспериментальных данных. При этом среднеквадратическое отклонение для оседаний и горизонтальных сдвижений составляет 20%, наклонов и относительных горизонтальных деформаций 40%, кривизны 80% [4]. Однако при умножении на коэффициент перегрузки расчетные показатели увеличивают амплитуду, но не меняют знак. Вместе с тем отклонение величин показателей сдвижений равновероятно как в меньшую, так и в большую сторону, причем для обеспечения 95-процентной надежности результата прогноза и достаточной выборке независимых данных (хотя бы порядка сотни) доверительный интервал будет составлять, по крайней мере  $\pm 2m$ . В этом случае на многих участках мульды сдвижений знак деформаций и сдвижений становится неопределенным, что весьма часто наблюдается на практике. Есть сведения [4], что величина разброса показателей сильно зависит от положения точки относительно центра мульды сдвижений. Однако эти данные противоречивы и не обладают полнотой и достоверностью. В связи с этим возникает необходимость совершенствования методики учета естественного разброса показателей сдвижений и деформаций земной поверхности.

Сопоставление расчетных величин сдвижений и деформаций с измеренными по данным натуральных наблюдений на



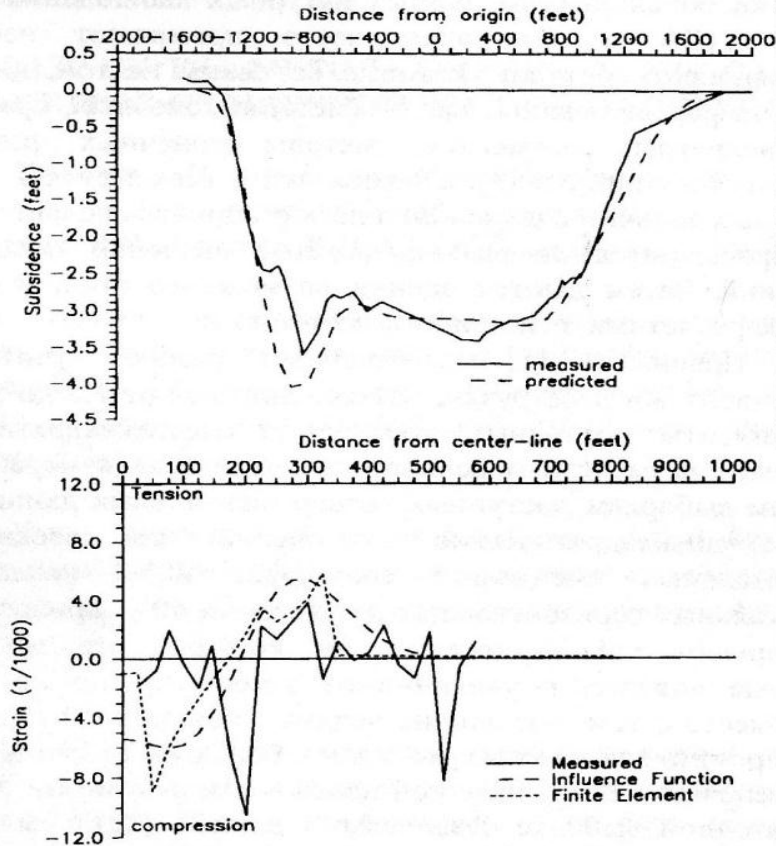


Рис. 1. Распределение опусканий (вверху) и горизонтальных деформаций земной поверхности при ее подработке несколькими очистными забоями [5]

шахтах Украины, СНГ, Англии, США показал, что разброс фактических показателей тем выше, чем сложнее конфигурация выработанного пространства, больше число смежных пластов и выше степень производной от оседаний (последний факт учтен в коэффициентах перегрузки). При этом анализ публикаций всех вышеперечисленных стран свидетельствует о незначимом вкладе инструментальных источников погрешностей в общий разброс

показателей. Свыше 80% разброса имеет иную природу и объясняется особенностями механизма сдвижений и разрушения коренных пород и наносов.

На рис. 1 показаны примеры сопоставления расчетных (детерминированных) распределений оседаний (вверху) и горизонтальных деформаций (внизу) вдоль мульды сдвижений земной поверхности, подработанной длинными очистными забоями, в результате чего образовалось выработанное пространство сложной конфигурации [5]. Сплошной линией показаны экспериментальные кривые, пунктирными линиями обозначены распределения оседаний и деформаций земной поверхности, полученные расчетными методами (методом функции единичного влияния, или конечных элементов). Из графиков видны основные закономерности, отмеченные в обзоре. Во-первых, отклонение величин показателей сдвижений наблюдается как в меньшую, так и в большую сторону. Во-вторых, чем выше степень производной по оседаниям, тем больше величина отклонений. Заметим, что данные цитируемой статьи также свидетельствуют о том, что для одиночных выработанных пространств простой конфигурации величины разброса заметно меньше, чем в случаях подработки земной поверхности несколькими очистными забоями, особенно по нескольким сближенным пластам.

На фундаментальном уровне главным источником разброса показателей является статистическая природа разрушения твердого тела, и, в частности горных пород и грунтов, а также наносов. Даже в механике разрушения металлов, полимеров, композитов эта проблема считается чрезвычайно сложной и далека от разрешения. Общий подход к решению этой проблемы пока основан на теории случайных процессов. Разброс показателей разрушения определяют путем учета влияния распределения исходных характеристик твердого тела на результаты его деформирования. В геомеханике такой подход интенсивно развивается днепропетровской горной школой [6]. Степень незнания и неопределенности компенсируют коэффициентами запаса или перегрузки. При сложных моделях



осуществляют массовые численные эксперименты расчетов, при которых характеристики модели меняются случайным образом по заданному закону. Затем находят распределение конечных показателей деформирования.

В данной статье описан опыт применения численного стохастического моделирования для определения закономерностей распределения разброса показателей сдвижений вдоль мульды.

### Методика исследований

Численное стохастическое моделирование выполнялось следующим образом. Вначале была выбрана модель для расчета сдвижений и деформаций земной поверхности. В качестве таковой принята модель наносов в виде плиты, прогибающейся на основании переменной жесткости [7]. Плита-наносы погружена собственным распределенным весом. В качестве основания принимаются коренные породы. Мощность плиты  $h$  равна мощности наносов (рис. 2). В тех местах, где земная поверхность подработана, жесткость основания  $K_2$  уменьшается по сравнению с жесткостью нетронутого массива  $K_1$ . Чем больше вынимаемая суммарная мощность, тем меньше жесткость  $K_2$ . Чем больше мощность междупластья или кратность подработки, тем выше цилиндрическая жесткость плиты-наносов. С помощью вышеперечисленных параметров можно подобрать такое их соотношение, чтобы форма кривой расчетных детерминированных оседаний земной поверхности соответствовала трендовой (усредненной) кривой фактических оседаний.

Расчет ведется в пространственной постановке, что дает возможность учесть произвольную конфигурацию выработанных пространств по всем смежным пластам. Преимуществом выбранной модели является ее относительная простота и разумное время моделирования, а также приемлемые затраты труда на подготовку и обработку данных стохастического моделирования. При проведении десятков численных

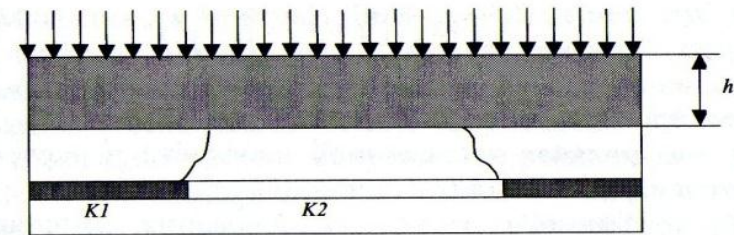


Рис. 2. Расчетная схема для определения показателей сдвижения земной поверхности

экспериментов это обстоятельство имеет важное практическое значение.

Естественный разброс деформационных и прочностных характеристик наносов и коренных пород моделируется путем вариации модуля деформации плиты и коэффициента жесткости коренных пород в узлах расчетной сетки. Указанная вариация механических характеристик осуществляется с помощью генератора случайных чисел. При этом случайное отклонение показателя от средней детерминированной величины подчиняется нормальному, нормальному усеченному или логнормальному законам распределения [6]. Таким простым, но достаточно эффективным подходом учитывается дискретная стохастическая природа разрушения толщи горного массива. Для того чтобы избежать необходимости расчета напряженно-деформированного состояния всей толщи используется известный подход, при котором деформационные характеристики всех слоев, слагающих коренные породы приводятся как эквивалентные к подошве плиты-слоя наносов.

Приведение осуществляется с учетом расстояния от текущего слоя до основания плиты-наносов. Расчетная схема, формулы и пример расчета оседаний, а также их производных приведен в статье [7].

Решение задачи прогиба плиты-наносов достигается решением известного дифференциального уравнения изгиба этой плиты:



$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} - \frac{K\omega}{D}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – прогибы точек плиты;  
 $q$  – нормальная к срединной плоскости и распределенная по поверхности плиты пригрузка от ее веса;  
 $K$  – коэффициент жесткости основания, изменяющийся в зависимости от наличия или отсутствия выработанного пространства;

$D$  – цилиндрическая жесткость плиты;  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ , где  $h$  – мощность плиты;

$E$  – приведенный модуль деформации слоистого массива;

$\mu$  – коэффициент Пуассона вмещающих пород.

Прогибы плиты-наносов находятся из решения системы линейных уравнений, которые заменяют дифференциальное, приведенное выше формулой (1). Остальные показатели сдвижений находят численным дифференцированием кривой прогибов по известным формулам и зависимостям [1].

В данной работе поставлена задача изучить закономерности разброса параметров сдвижений при отработке одиночного пласта. При этом необходимо охватить основные геомеханические ситуации, которые складываются при развитии очистных работ в пределах одиночного пласта. Главными геомеханическими ситуациями, имеющими качественные отличия, являются: отработка одиночной, примыкающей лав, работа очистного забоя в условиях полной и неполной подработки земной поверхности, а также отработка лав с оставлением межлавных целиков. Для того чтобы охватить эти ситуации и уменьшить трудоемкость исследований были приняты следующие условия разработки. Пологий угольный пласт мощностью 1,0 м отрабатывается на глубине 500 м. Длина лавы составляет 250 м. Это позволит с помощью всего двух лав охватить ситуацию полной и неполной подработки земной поверхности. Вмещающая толща представлена осадочными породами песчано-глинистого состава, характерного для условий

Донецко-Макеевского района Донбасса. Именно эти условия изучены наиболее полно, что позволит сравнить результаты исследований с известными экспериментальными данными.

Методика исследований была следующей. Вначале для каждой геомеханической ситуации производился расчет сдвижений и деформаций земной поверхности в детерминированной постановке задачи. Мощность (20 м) и приведенные деформационные свойства наносов принимались такими, чтобы при отработке второй лавы наступала полная подработка земной поверхности. Поскольку при вычислении допустимых или опасных деформаций в Правилах используются только наклоны, горизонтальные деформации и кривизна (радиус кривизны), разброс параметров мульды сдвижений вычислялся только для этих показателей. Вычислялись только дополнительные оседания, обусловленные влиянием выработанных пространств (за вычетом оседаний земной поверхности под действием веса подработанной толщи). Все результаты строились на графиках в безразмерных величинах, приведенных к максимальному значению. Длина мульды разбивалась на узлы, а величины опусканий, наклонов, и деформаций приводились к максимальным, полученным в детерминированных решениях, путем нормирования. Это позволило устранить нестабильность величин разброса показателей сдвижений и зависимость их от абсолютной величины оседаний.

Затем решались три большие задачи для вычисления показателей сдвижения при следующих ситуациях.

- Сдвижение над одиночной лавой длиной 250 м, когда осуществлялась неполная подработка земной поверхности.
- Суммарное сдвижение над двумя лавами, отработанными без оставления межлавных целиков с небольшим перерывом. При этом наступало условие полной подработки земной поверхности, но сдвижение над суммарным выработанным пространством происходило как бы над одной лавой длиной 500 м.



- Обработка двух лав по 250 м с оставлением межлавного целика шириной 50 м.

Параметры модели настраивались таким образом, чтобы соотношения максимальных оседаний и форма мульд сдвижений для одиночного и двойного выработанных пространств совпадали с типовыми кривыми, полученными согласно Правил...[1]. Одна большая задача для отдельной геомеханической ситуации состояла из 80-100 решений, каждое из которых получено для случайного набора приведенных деформационных показателей плиты-наносов и жесткости ее основания. Подобный случайный набор формировался автоматически с помощью генератора случайных чисел в компьютере в процессе решения. Согласно [6, 7] распределение механических характеристик вмещающих пород подчиняется нормальному, нормальному усеченному или логнормальному законам. В одной и той же точке массива заранее не возможно предсказать конкретную реализацию прочности или модуля деформации на заданный момент. Можно говорить лишь о вероятной величине этого параметра из заданного диапазона, математического ожидания и закона распределения. В данной работе было принято нормальное распределение приведенного модуля деформации с 30-процентным разбросом.

Согласно рекомендациям Правил...[1], расстояние между узлами расчетной сетки принималось равным 20 м. Поскольку задача решалась в пространственной постановке, использовалось длинное вытянутое выработанное пространство. Это позволило сократить число реальных численных экспериментов до 4-5 на каждую задачу. Отдельным численным экспериментом было установлено, что дальность влияния отдельной флуктуации приведенного деформационного показателя наносов с максимальным отклонением от средней величины (в данном случае 30%) не превышает 3 узлов расчетной сетки. На основании этого из одного решения выбирались параллельные сечения через каждые 5-6 узлов расчетной сетки. Эти сечения являлись независимыми, на основании чего данные решений по всем этим сечениям могли быть объединены в общую

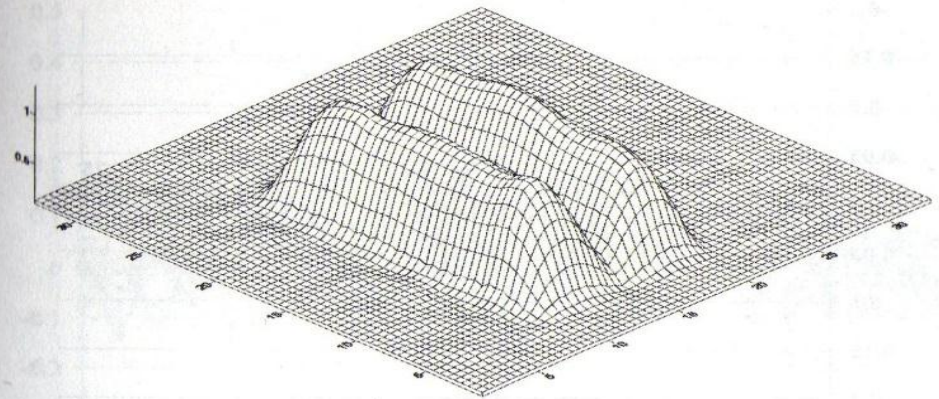


Рис. 3. Пространственная картина оседаний земной поверхности над двумя лавами, разделенными целиком угля в одном из стохастических экспериментов

статистическую выборку данных. Такой подход позволил за четыре-пять решений получать около сотни наборов данных. Это означает, что в каждом узле вертикального сечения мульды сдвижений набиралось порядка 60-100 независимых значений показателя сдвижения, что давало основание для построения распределения и статистического его анализа.

### Результаты численного моделирования

На рис. 3 приведен пример пространственного распределения оседаний земной поверхности после обработки двух смежных лав, разделенных целиком угля шириной 50 м. При этом заметны случайные отклонения величин оседаний, полученные за счет стохастического моделирования разброса механических свойств вмещающих пород.

На рис. 4 показана сводная картина отклонений первой производной вдоль мульды сдвижений над одиночной лавой по всем стохастическим экспериментам. Видно, что разброс отклонений над средней частью мульды максимален, а на ее



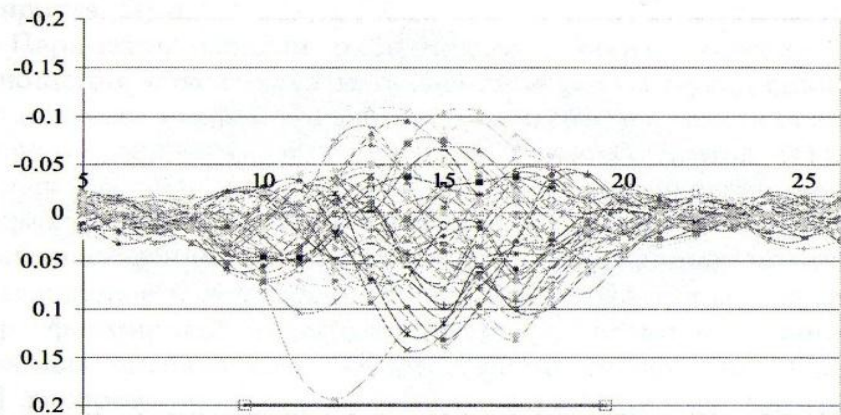


Рис. 4. Распределение случайных отклонений первой производной оседаний от детерминированного значения вдоль мульды сдвижений над одиночной лавой

краевых частях разброс отклонений уменьшается до минимума, отвечающего фоновому уровню над нетронутым массивом.

Сравнение сводных распределений первой и второй производных от оседаний показывает, что разброс отклонений второй производной примерно в два раза выше, чем разброс отклонений первой производной (рис. 5). Этот результат хорошо согласуется с экспериментальными данными, на основе которых получены поправочные коэффициенты или так называемые коэффициенты перегрузки [4].

Характерно также, что максимальная величина разброса случайных отклонений максимальна над средней частью суммарного выработанного пространства, образованном совместной бесцеликовой отработкой двух смежных лав. В то же время сводный график распределений стохастических отклонений величин оседаний над двумя выработанными пространствами, разделенных целиком шириной 50 м показывает, что максимальная величина отклонения приурочена к

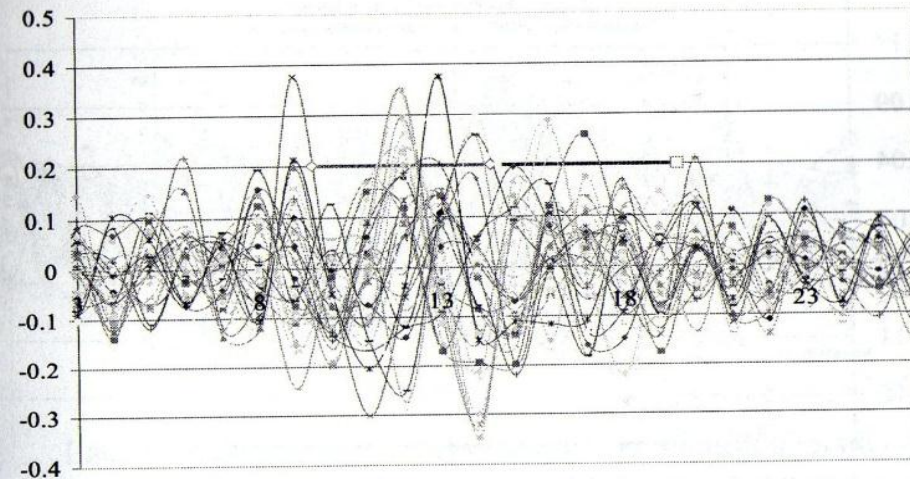


Рис. 5. Распределение случайных отклонений второй производной оседаний от детерминированного значения вдоль мульды сдвижений над суммарным выработанным пространством

центральной части целика, а также середине отдельных выработанных пространств смежных лав (рис. 6). На переходе от выработанного пространства к массиву или целику угля амплитуда разброса случайных отклонений уменьшается.

Установлено, что распределения случайных отклонений оседаний от детерминированных значений достаточно хорошо описываются нормальным законом. Это иллюстрируется примером такого распределения первой производной оседаний в одной из точек среднего участка мульды сдвижений для одиночной лавы (рис. 7). Распределения таких отклонений в каждом из выбранных узлов расчетной сетки обрабатывались стандартным пакетом программ статистического анализа данных, в результате чего получали теоретическое приближение огибающей нормального распределения, указанного на рис. 7 сплошной плавной линией. По данным такой статистической обработки результатов стохастического моделирования в каждом



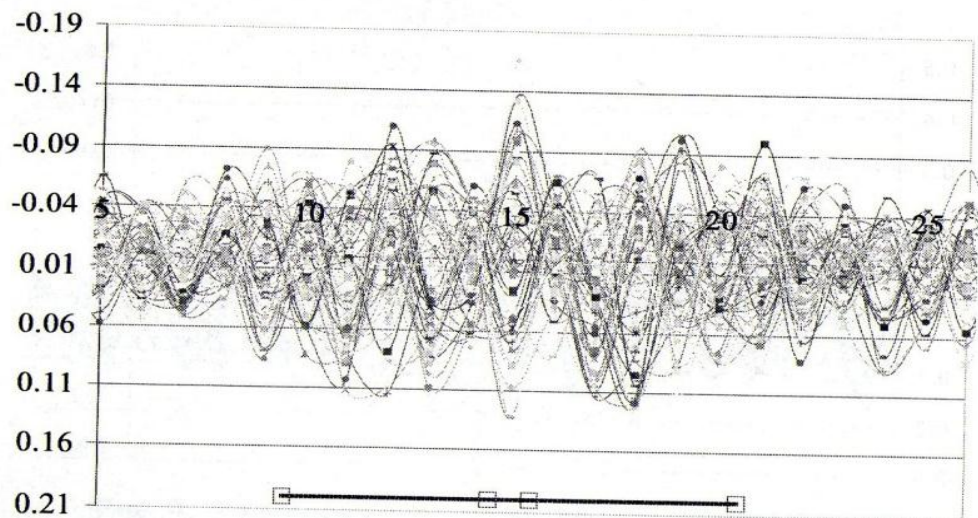


Рис. 6. Распределение случайных отклонений первой производной оседаний от детерминированного значения вдоль мульды сдвижений над двумя выработанными пространствами, разделенными целиком

из узлов расчетной схемы (или точки мульды сдвижений) определялись границы доверительного интервала отклонений при заданной вероятности 95%. Эти границы наносились на трассе мульды сдвижения в каждом узле расчетной сетки. Затем полученные точки соединяли сглаженной кривой.

Анализ результатов такой обработки данных показал, что разброс случайных отклонений показателей сдвижений от детерминированной их величины в средней части выработанного пространства или целика действительно больше в 2 раза по сравнению с разбросом в нетронутым массиве. В связи с этим предлагается использовать вместо коэффициентов перегрузки  $K_{пер}$  доверительные интервалы разброса случайных отклонений, амплитуду которых следует привязать к положению точки относительно центра мульды сдвижений. На переходе от выработанного пространства к краевой части массива или целику

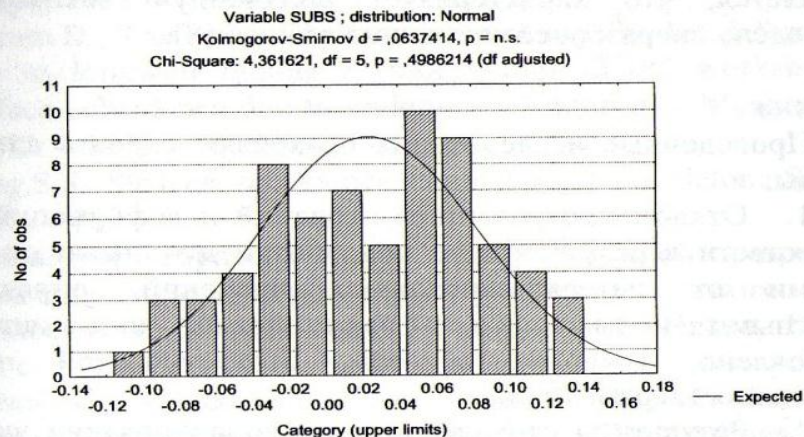


Рис. 7. Распределение случайных отклонений первой производной оседаний от детерминированного значения в одной из точек мульды

величину разброса можно в первом приближении положить равной  $\pm K_{пер}-1$ . Поскольку амплитуда отклонения разбросов в нетронутым массиве отличается примерно в 2 раза от максимальной амплитуды в центре выработанного пространства или середине целика, вышеуказанная величина разброса в переходной зоне отличается от амплитуды разброса в нетронутым массиве в  $(1+2)/2=1,5$  раза. Исходя из пропорций получаем доверительные интервалы разброса в нетронутым массиве и средней части выработанных пространств или целиков, равные соответственно  $\pm 0,67(K_{пер}-1)$  и  $\pm 1,33(K_{пер}-1)$ . Такая коррекция коэффициента перегрузки практически не меняет сумму поправок на величину случайного отклонения показателей сдвижений вдоль всей мульды, а лишь более рационально перераспределяет указанную поправку.

Проверка результатов моделирования при другом шаге разбивки расчетной сетки показала, что соотношение разброса стохастических отклонений показателей сдвижений не



изменяется, что характеризует полученную закономерность распределения разброса как закономерную [8].

### Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Отклонение величины оседаний и деформаций земной поверхности в результате ее подработки длинными очистными забоями от детерминированных значений, определяемых известными нормативными документами, или методиками обусловлено, главным образом, стохастической природой разрушения твердого тела.

2. Результаты стохастического моделирования указанных отклонений показывают, что их разброс максимален в средней части выработанного пространства, или целика угля и примерно в 2 раза больше, чем на границе с нетронутым массивом.

3. На основании этого предложено величину поправки расчетных показателей сдвижений принимать в зависимости от положения точки относительно центра мульды сдвижений. При этом доверительный интервал разброса случайных отклонений оседаний и деформаций земной поверхности следует определять согласно такому закону: на границе мульды с нетронутым массивом  $\pm 0,67(K_{пер}-1)$ , на границе выработанного пространства  $\pm(K_{пер}-1)$  и в средней части выработанного пространства или целика  $\pm 1,33(K_{пер}-1)$ , где  $K_{пер}$  – коэффициент перегрузки, определяемый согласно Правилам...[1].

Авторы выражают благодарность проф., д.т.н. Могильному С.Г. за ценные консультации при постановке задачи стохастического моделирования и трактовки их результатов.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / Минуглепром СССР. – М.:

Недра, 1981. – 288 с.

- Ingram D., Trevits M. Characteristics of overburden deformation due to longwall mining // Proceedings: Third workshop on surface subsidence due to underground mining. – Morgantown: WVU. – 1992. – Pp. 280-298.
- Peng S.S. Surface subsidence engineering. – Littleton: SMME, 1992. – 162 с.
- Сдвижение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений / Акимов А.Г., Земисев В.Н., Кацнельсон Н.Н. и др. – М.: Недра, 1970. – 224 с.
- Karmis V., Haycocks C., Agioutantis Z. The Prediction of Ground Movements caused by mining // Proceedings: Third workshop on surface subsidence due to underground mining. – Morgantown: WVU. – 1992. – Pp 1-9.
- Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: Університетське видавництво "Пульсари", 2002. – 302 с.
- Бугара М.И., Коломиец В.А. Влияние неоднородностей распределения физико-механических свойств массива на стохастичность оседания земной поверхности // Проблеми гірського тиску. – 2001. – №6. – С. 46-65.
- Тихонов А.П., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач – М.: Наука, 1976. – 286 с.

Здано до редакції

Рекомендовано до друку д.т.н. Сдвижковою О.О.