

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*М.Э. Гордиенко, В.В. Музалевский, Донбасская топливно-энергетическая компания, Украина
Н.А. Колесник, Г.И. Козловский, В.В. Назимко, Донецкий национальный технический
университет, Украина*

Предложен способ перехода от детерминированной оценки деформаций к установлению вероятности разрушения здания в определенной части мульды сдвижения. Вероятность повреждения объекта может быть определена как произведение вероятности реализации определенного уровня критической деформации здания и вероятности деформаций земной поверхности.

Введение. Несмотря на значительный прогресс в изучении сложного механизма взаимодействия подрабатываемой толщи коренных пород и наносов проблема подработки земной поверхности, зданий, сооружений и природных объектов, расположенных на ней также остается актуальной. Сложность при исследовании данного взаимодействия обусловлена несколькими причинами, главными из которых являются необратимость деформаций, а также их естественный разброс. В подавляющем числе случаев подрабатываемый массив горных пород, наносы, фундаменты зданий и сооружений и сами сооружения испытывают неупругие деформации за пределом прочности. Кроме того на величину деформаций оказывают влияние целый ряд факторов, имеющих стохастическую природу [1]. Именно поэтому отраслевые указания для расчета оседаний и деформаций земной поверхности используют эмпирические подходы [2-4]. При этом вначале определяются наиболее вероятные величины оседаний и деформаций, а затем умножаются на так называемый коэффициент перегрузки, который учитывает неопределенность процесса сдвижений и обеспечивает определенный запас прочности подрабатываемых сооружений.

Специальные исследования [1] показали, что разброс деформаций подрабатываемого массива более чем на 60 % обусловлен естественной вариацией прочностных и на 20 % деформационных характеристик вмещающих пород. Заметный вклад в вариацию величин деформаций подрабатываемой толщи вносят неопределенность положения границ выработанных пространств и охранных сооружений, случайные колебания вынимаемой мощности пластов и вмещающих пород и ряд других второстепенных факторов.

Более того, наибольшую неопределенность в количественную оценку механических свойств массива горных пород вносит переход от свойств в образце к свойствам в массиве [5]. Так трещиноватость массива может на порядок снизить предел прочности породы на растяжение в зависимости от ориентации главной компоненты напряжений относительно ориентации плоскостей системы трещин.

Так, например оседания η , горизонтальные сдвижения ξ , наклоны i , горизонтальные деформации ε и кривизну K земной поверхности рассчитывают согласно нормативным документам [2-4] и представляют в виде конкретных детерминированных кривых. Вместе с тем, натурные инструментальные наблюдения свидетельствуют о том, что фактические значения параметров сдвижений и деформаций существенно отличаются от расчетных (рис. 1). Так среднеквадратическое отклонение η находится в пределах $\pm 30\%$, ξ , i , ε – $\pm 50\%$ и K – $\pm 100\%$.

Попытка учесть естественный разброс фактических сдвижений и деформаций земной поверхности на участках мульды сдвижения была предложена в российском нормативном документе [3]. Однако указанная попытка имеет существенные недостатки.

Вначале по описанной методике в районе объекта выбираются три точки зоны и определяются расчетные сдвижения и деформации в этих точках. Положение точек 1-3

находится исходя из ошибок положения зоны сдвижения на местности ΔL , но не менее 10 м [3]. Под объектом принимаются наибольшие расчетные значения сдвижений и деформаций, получаемые в одной из выбранных трех точек.



Рис. 1. График измеренных и расчетных наклонов земной поверхности [6]

Таким образом, методика учитывает неопределенность не только величины, но и знака деформаций в любой точке мульды сдвижений. Вместе с тем, несмотря на правильный подход, методика существенно сужает пределы возможных вариаций оседаний и деформаций земной поверхности и не дает значения вероятности этих вариаций. Случайная вариация методикой [3] учитывается через использование детерминированной кривой оседаний или деформаций, а не действительным законом вариации. Так на участке мульды, где расчетный показатель оседаний или деформаций не будет меняться, вариация будет отсутствовать, в то время когда объективно она имеет место всегда и в любой части мульды.

Обоснование новой методики расчета оседаний и деформаций земной поверхности с учетом их естественного разброса. Исследования, выполненные с помощью численного компьютерного и физического моделирования, а также натурных инструментальных наблюдений [1, 7] показали, что распределение любых показателей деформации земной поверхности в пределах мульды сдвижений относительно ожидаемых значений, определенных по методике [4] не противоречат нормальному закону. При этом вдоль мульды величины разброса оседаний и деформаций не являются постоянными, и в центре мульды максимальны, причем на границах мульды разброс показателей деформаций не стремится к нулю (рис. 2).

Расчеты (для стохастической модели) выполнены при типичных условиях подработки земной поверхности одиночной лавой: мощность угольного пласта составляет около 1,7 м, породы средней обрушаемости, класса A_1, A_2 . Породы представлены перемежающимися слоями алевролитов и песчаников средней прочности, при этом средняя мощность слоев 10-15 м. Залегание пород горизонтальное. Прочность пород в пределах 40-70 МПа. Породы умеренно обводненные. Способ управления кровлей осуществляется путем ее полного обрушения. Угольный пласт отрабатывается по столбовой системе разработки, скорость подвигания лавы 100-150 м/мес. Марка угля К. Глубина разработки 210 м, длина лавы 290 м, мощность наносов 60 м. Модуль деформации 0,001-15 ГПа, коэффициент Пуассона 0,1-0,5, угол внутреннего трения 10-50 град, сцепление 0,001-15 МПа, плотность 2500 кг/м³, объемный вес 0,025 МН/м³.

По рисунку 2 видно, что поправка оседаний за их естественный разброс в обе стороны относительно ожидаемых величин максимальна в центральной части мульды сдвижения и равна 549 мм. На границе мульды эта поправка уменьшается до значения 124 мм или 23 % от максимального значения.

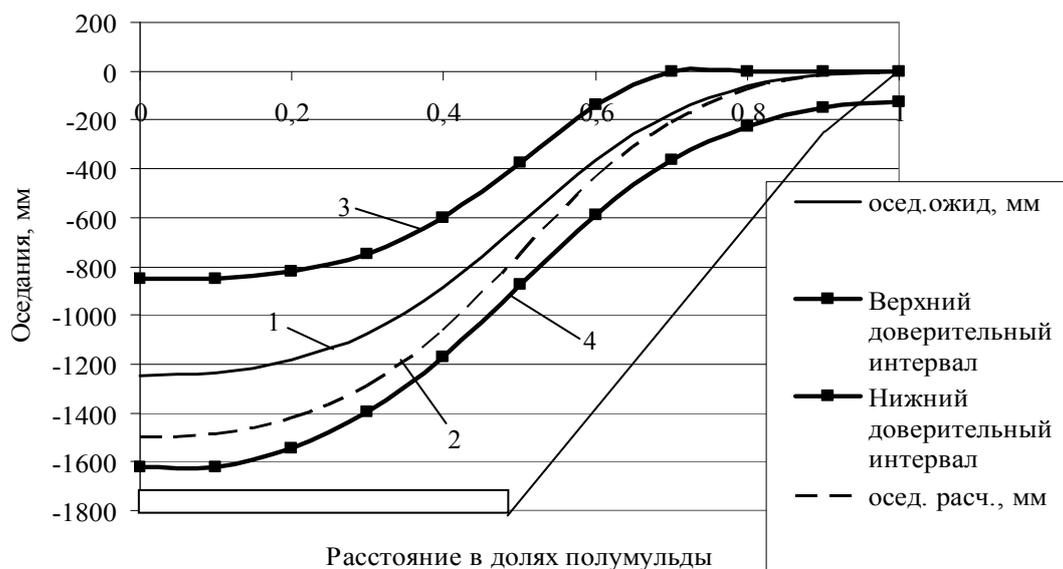


Рис. 2. График значений оседаний, рассчитанных по действующей [4] и предлагаемой методикам

То же самое наблюдается для наклонов и кривизны. В случае наклонов поправка в центре мульды равна $8,6 \times 10^{-3}$ (100 %), на краевой части мульды $2,7 \times 10^{-3}$ (31 %), а для кривизны данные поправки составляют $0,18 \times 10^{-3}$ 1/м (90 %) в центральной части мульды сдвижений и $0,05 \times 10^{-3}$ 1/м (25 %) на границе мульды. Для кривизны максимальная поправка наблюдается на расстоянии $0,3z$ (где z – безразмерная координата вдоль главного сечения полумульды, в долях полумульды) от длины полумульды и составляет $0,2 \times 10^{-3}$ 1/м (100 %).

По сути, положение точки перехода показателя сдвижения или деформации через нулевое значение не является однозначным, а располагается в каком-то диапазоне, имеющем определенный доверительный интервал. Этот факт объясняет ненулевые значения наклонов и кривизны по предлагаемой методике в расчетной граничной точке мульды и в точке максимального оседания, определенные по «Правилам подработки...» [4].

При определении доверительных интервалов оседаний земной поверхности необходимо учесть естественное физическое ограничение, заключающееся в том, что оседания не могут превысить вынимаемой мощности пласта и для статической мульды не могут быть отрицательными (поднятиями). В среднем максимальные оседания для условий Донбасса не превышают $0,85m$ (где m – вынимаемая мощность угольного пласта, м), однако в реальности возникают ситуации, когда оседания равны вынимаемой мощности. В частности вероятность этого увеличивается с увеличением скорости подвигания лавы, когда процесс полного обрушения приобретает черты плавного опускания кровли [8]. Поэтому в случае, когда расчетные оседания по предлагаемой методике превышают вынимаемую мощность пласта, оседания принимают равными вынимаемой мощности (рис. 2).

Установленная закономерность получена на основании представительной выборки экспериментальных данных, включающих результаты моделирования (288 численных экспериментов на стохастической трехмерной и плоской конечно-элементной модели с учетом запредельного деформирования массива горных пород) и данные натуральных наблюдений (4 профильных линии собственного эксперимента и 16 наблюдательных станций других авторов). Пример генеральной выборки данных экспериментов по измерению оседаний показан на рис. 3.

Статистический анализ отдельных выборок на определенных интервалах мульды сдвижений показал, что в любом сечении мульды распределение естественного разброса оседаний не противоречит нормальному распределению с достоверностью 95 % (сечения А, В на рис. 3). При этом границы доверительного интервала возможных отклонений от

ожидаемой величины оседаний описываются параболическими зависимостями с максимумом в центре мульды.

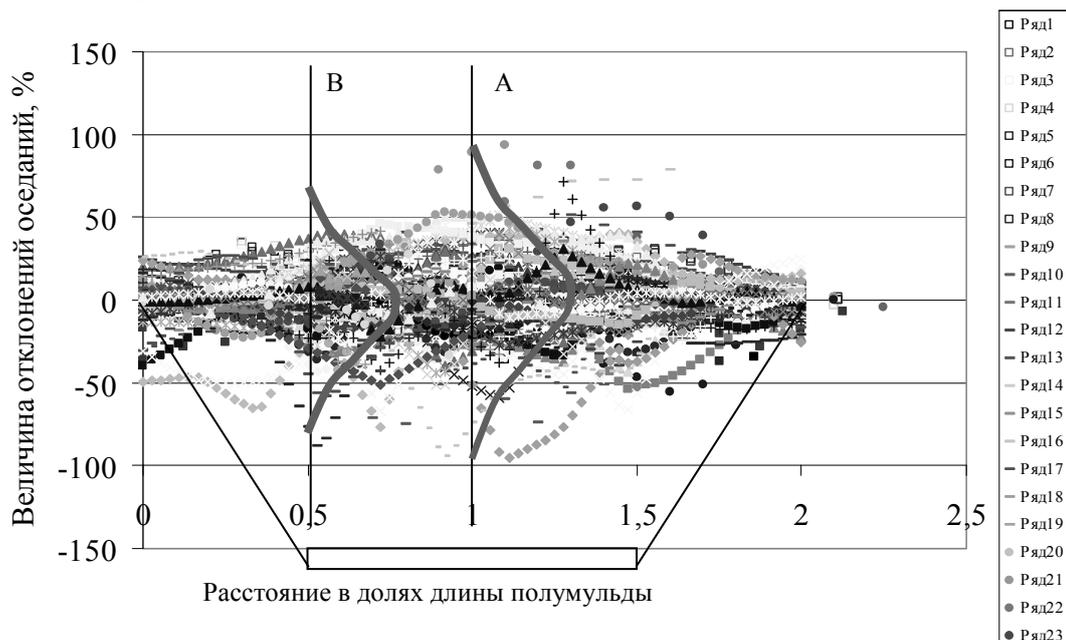


Рис. 3. Распределение отклонений оседаний земной поверхности, полученное при анализе результатов стохастического моделирования и результатов натуральных измерений

Учет неоднозначности положения границ мульды сдвижений. Отсутствие нулевого разброса оседаний и деформаций на расчетных границах мульды означает, что и положение границ мульды не является однозначным. Оказалось, что это положение варьирует в диапазоне $\pm 17\%$ (для одного СКО), то есть вероятность этого утверждения равна примерно 68 % (рис. 4). Такое отклонение фактических длин полумульды сдвижений от ее расчетного положения получено на основании обработки результатов 16 натуральных экспериментов [6, 9-11].

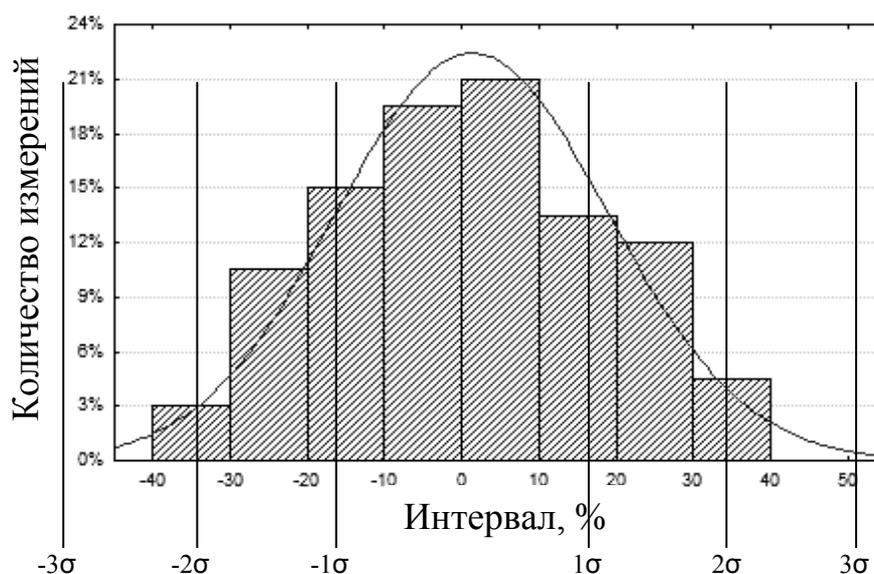


Рис. 4. Распределение разброса положения границы мульды сдвижений совместно по результатам компьютерного моделирования авторов и натуральных экспериментов других исследователей

Выделение проблемы оценки поврежденности подрабатываемого сооружения.

Проблема неопределенности деформаций зданий и сооружений не будет исчерпана, если не затронуть естественный разброс материалов, из которых изготовлены эти подрабатываемые объекты. Известно, что пределы прочности и деформационные показатели металлов и строительного камня (бетона, шлакоблоков, кирпичной кладки) подвержены естественному разбросу точно также как и всех твердых тел, включая горные породы. Указанный разброс является естественным, потому, что обусловлен кинетической природой прочности твердых тел.

Существенное влияние на величину деформаций фундаментов зданий и сооружений, а также на их разброс оказывает процесс взаимодействия фундаментов с грунтами, на которых они возведены. В итоге для повышения достоверности определения последствий подработки зданий и сооружений необходимо учитывать не только естественный разброс механических свойств грунтов, но и материалов, из которых изготовлены здания.

Авторами выполнены расчеты допустимых и предельных деформаций для типичных сооружений и конструкций при следующих исходных условиях:

1) дворец культуры имеет Г-образную форму; здание одноэтажное; длина здания 80 м, ширина 30 м, размер Г-образных построек 20 м; количество швов, разделяющих основной корпус здания на отсеки – 1; материал и толщина стен соответственно кирпич, 380 мм; конструкция перекрытий – железобетонные плиты; износ стен составляет 11-20 %; грунт под фундаментом здания – плотные глины; высота здания, от подошвы фундамента до верха карниза равна 11,5 м;

2) кузнечный цех машиностроительного завода имеет четырехугольную форму; здание одноэтажное; длина и ширина здания соответственно 90 м и 20 м; конструкция здания - каркасное, без связевого блока; 2 деформационных шва; высота колонн равна 9 м; состояние здания хорошее; грунт под основанием здания – плотные глины;

3) мостовые краны имеют длину пролета 14 м; высота колонн подкранового пути равна 7 м; высота надкрановой части колонн 2 м; направление подкранового пути – параллельно длинной стороне здания.

Наличие естественных факторов, вносящих существенный вклад в неопределенность оценки степени повреждаемости подрабатываемых зданий и сооружений в известной степени подтверждается тем, что величины допустимых деформаций зданий и сооружений в последнем нормативном документе [4] уменьшены в 1,71-3,3 раза, что видно из сравнения результатов расчетов, приведенных в таблице 1.

Очевидно, что уменьшение допустимых деформаций обусловлено не только повышением требований к устойчивости сооружений, но и признанием факта существенного влияния неопределенности.

Обоснование новой методики оценки поврежденности подрабатываемого сооружения. Поскольку вариации величин допускаемых деформаций зданий и сооружений обусловлены как неопределенностью процесса сдвижений, так и естественной вариацией механических свойств объектов, которые сооружены на подрабатываемом участке, мы предлагаем сопоставлять возможные деформации земной поверхности с учетом их естественного разброса (в виде криволинейной полосы 1) (рис. 2) с прямоугольной полосой 2 доверительного интервала допустимых предельных деформаций здания или сооружения (рис. 5). Затем на их пересечении или частичном наложении определять вероятность разрушения сооружения. Так вероятность разрушения на интервале А будет максимальна и равна 1. Это значит, что в пределах этого интервала сооружение будет наверняка повреждено. Интервал Б ограничивает всю опасную зону, в пределах которой может быть повреждено сооружение. При этом за пределами интервала А вероятность начинает уменьшаться с единицы и падает на границах зоны Б до минимума. Поскольку можно с высокой достоверностью предположить, что свойства грунта и основания здания независимы, вероятность повреждения здания равна произведению вероятности деформации грунта на вероятность реализации той или иной прочности фундамента и стен здания.

Таблица 1 - Сравнительная таблица допустимых и предельных деформаций земной поверхности под зданиями и мостовыми кранами вычисленных по «Правилам охраны...» [2] и «Правилам подработки...» [4]

Наименование объекта	Разряд	Длина здания (отсека)	Этажность	Вид деформации	Нормативное значение		Допустимые значения деформации	Предельные значения деформации
					допустимых деформаций	Предельных деформаций		
«Правила охраны...» [2]								
1. Дворец спорта	1	80	1	Δl , мм ε , $1 \cdot 10^{-3}$	90 -	160 -	66 2,75	118 4,90
2. Кузнечный цех машиностроительного завода	3	90	1	ε , $1 \cdot 10^{-3}$	4,00	7,30	<u>3,96</u>	7,23
3. Подкрановые пути мостовых кранов:								
а) в продольном направлении	-	-	-	i , $1 \cdot 10^{-3}$ R, км	- -	- -	6,0 6,0	- -
б) в поперечном направлении	-	-	-	i , $1 \cdot 10^{-3}$ ε , $1 \cdot 10^{-3}$	- -	- -	5,0 17,5	- -
«Правила подработки...» [4]								
1. Дворец спорта	2	80	1	Δl , мм	55	-	36	-
2. Кузнечный цех машиностроительного завода	2	90	1	ε , $1 \cdot 10^{-3}$	1,2	-	<u>1,2</u>	-
3. Подкрановые пути мостовых кранов в поперечном направлении	-	-	-	ε , $1 \cdot 10^{-3}$	-	-	3,5	-

Существующая методика, основанная на детерминированном определении деформаций земной поверхности и учете детерминированных предельных или допустимых деформаций сооружений дает границы повреждения здания на интервале В, причем по умолчанию вероятность разрушения согласно существующим нормативным документам внутри интервала В равна единице, а за его пределами нулю (рис. 5). Практика показывает, что такой резкий перепад вероятности поврежденности нереален. Очевидно, что в действительности переход от полностью опасной зоны к неопасной имеет конечную длину и происходит плавно, как это показано пунктирной кривой на верхнем фрагменте рис. 5.

рационально. Это значит повышение надежности эксплуатации объекта при нулевых дополнительных затратах.

Поправка на неопределенность расчетных величин деформаций, введенная в [3] не обеспечивает такого позитивного эффекта. Величина поправки согласно [3] зависит от наклона кривой деформаций, а не от объективной величины естественного их разброса. Это значит что при прочих равных условиях, например при фиксированном размере подрабатываемого сооружения, поправка по [3] будет минимальной и близкой к нулевой на участках, где касательная к кривой деформаций приближается к горизонтальной линии. На самом деле величина разброса, как показали наши исследования, являются функцией расстояния от центра мульды сдвижений и уменьшается от центра мульды к ее границам согласно закону, который отражается колоколообразной кривой.

Таким образом, модифицированная авторами методика обеспечивает более достоверное определение доверительного интервала повреждения подрабатываемого сооружения.

Краткое описание новой методики. Характер распределения оседаний и деформаций земной поверхности и подрабатываемого сооружения, а также расчет значений их разброса производится по следующей методике:

1. Вычисляем ожидаемые распределения оседаний или деформаций (например наклонов) по нормативным документам [2-4] (см. рис. 5).

2. Вводим поправку в детерминированные величины деформаций по формуле:

$$i = i_0 \pm \Delta i,$$

где i_0 – ожидаемая деформация;

Δi – определяется по формуле:

$$\Delta i = \frac{i_{0\max} * \Delta}{100},$$

где Δ – величина стохастического разброса наклонов, определяемая в процентах по рис. 6 и вычисляется по формуле (1), в которой эмпирические коэффициенты A, B, C принимаются из табл. 2 в строке 2:

$$\Delta S = \pm A / (B + C * x^2), \quad (1)$$

где A, B, C - эмпирические коэффициенты;

x - расстояние от центра мульды или от границ плоского дна, доли полумульды.

Таблица 2 - Итоговая таблица эмпирических коэффициентов для одного СКО

№ п/п	Вид деформации	Эмпирические коэффициенты		
		A	B	C
1	Оседания	2,95	9	20
2	Наклоны, горизонтальные деформации	5	9	20
3	Кривизна	10,7	9	20

В итоге в отличие от нормативной методики вместо одностороннего коэффициента перегрузки мы используем двухсторонний доверительный интервал.

3. На **полосу** возможных величин деформаций земной поверхности налагаем **полосу** доверительного интервала допустимых деформаций подрабатываемого сооружения. Пока не будут получены новые уточненные данные, принимаем, что случайный разброс величин предельных деформаций зданий и сооружений согласуется с нормальным законом распределения, имеет среднее, равное табличному значению, определяемому с указаний [2-4] и СКО, составляющее 30 % от среднего.

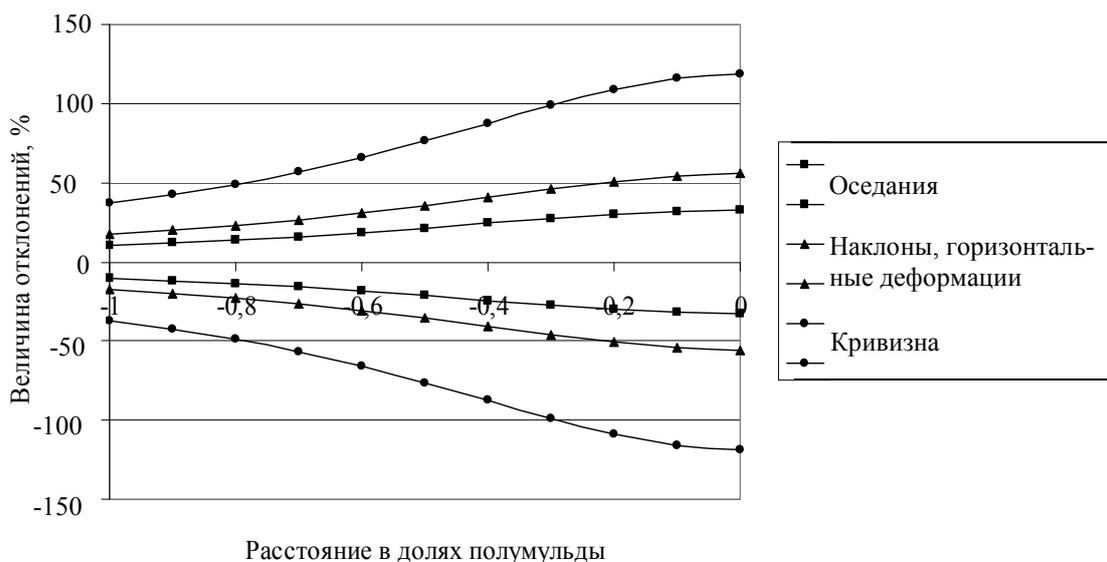


Рис. 6. Огибающие распределений величины разброса оседаний, наклонов и кривизны относительно ожидаемых

4. Определяем диапазон практически достоверного повреждения сооружения на интервале между границами пересечения ожидаемых деформаций земной поверхности и средней величины допустимых деформаций (интервал А на рис. 5).

5. Находим границы интервала возможного повреждения сооружения на пересечении нижней границы допустимых деформаций сооружения (то есть минимально возможных допустимых деформаций) и верхней границы возможных величин деформаций земной поверхности (то есть максимальных возможных). Этот интервал указан буквой Б на рис. 5.

6. Определяем переходные интервалы опасной подработки сооружения между границами практически достоверного повреждения и границами возможного повреждения сооружения.

7. Определяем возможность R повреждения в пределах переходных интервалов по эмпирической формуле:

$$R = -2,2x^3 + 3,2x^3,$$

где x – безразмерное расстояние вдоль переходных зон начиная от границ практически достоверного повреждения подрабатываемого объекта (вся длина переходной зоны принимается за единицу).

8. Объем мероприятий по усилению конструкции сооружения или предотвращению возможных повреждений определяем пропорционально рассчитанной возможности повреждения.

Выводы.

1. Анализ существующих нормативных документов свидетельствует о том, что они прогнозируют сдвигения и деформации земной поверхности с помощью гладких типовых кривых, которые дают детерминированные значения оседаний и деформаций. Однако при сравнении прогнозных и фактических сдвигений и деформаций возникает разброс, который нельзя полностью учесть введением коэффициента перегрузки. На сегодняшний день не установлена величина доверительного интервала разброса величин сдвигений и деформаций, а также положения границ мульды сдвигения.

2. Величина разброса оседаний и деформаций земной поверхности на границе мульды сдвигений составляет одну треть от максимальных значений в ее центре, а среднее квадратическое отклонение места положения границы равно $\pm 17\%$ длины полумульды.

3. Вариация ΔS величин сдвигений и деформаций земной поверхности над очистной выработкой пологого угольного пласта распределена согласно усеченному нормальному

закону в любой точке сечения мульды сдвижений, а диапазон разброса является центрированной случайной функцией расстояния вдоль полумульды, с границами доверительного интервала, описываемые обратной параболической зависимостью типа $\Delta S = \pm A / (B + C * x^2)$, где x - расстояние от центра мульды или от границ плоского дна в долях полумульды.

4. От детерминированной *оценки интервалов* мульды сдвижений, на которых подрабатываемое сооружение будет повреждено, следует перейти к оценке *вероятности* повреждения на характерных участках мульды. Указанные характерные участки определяются на пересечении границ доверительных интервалов допустимых деформаций зданий и сооружений и границ возможных деформаций земной поверхности. Вероятности повреждения сооружения определяются как произведение вероятности реализации допустимой деформации сооружения на вероятность реализации деформации земной поверхности.

5. Необходимо установить параметры распределений допустимых деформаций зданий и сооружений и заменить конкретные величины допустимых деформаций на параметры их распределений.

Список литературы

1. Бугаёва Н.А. Особенности распределение стохастических отклонений оседаний земной поверхности при ее подработке одиночной лавой / Н.А. Бугаёва, В.В. Назимко // Проблемы гірського тиску. – 2008. – Вип.16. – С. 194-237.
2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
3. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – СПб., 1998.
4. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом : ГСТУ 101.00159226.001: 2003. - [Введ. 01.01.2004]. – К., 2004. – 128 с.
5. Шашенко А.Н. Масштабный эффект в горных породах / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.В. Кужель. - Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. – 132 с.
6. Сдвигание горных пород и земной поверхности при подземных разработках / под общей ред. В.А. Букринского и Г.В. Орлова. – М.: Недра, 1984. – 247 с.
7. Бугайова Н.А. Геомеханічне обґрунтування параметрів зрушення земної поверхні неоднорідного породного масиву при відпрацюванні положистих вугільних пластів.: авт. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.09 / Н.А. Бугайова. – Дніпропетровськ, 2012. – 22 с.
8. Назимко И. В. Исследование влияние скорости подвигания очистного забоя на характер деформирования покрывающих пород / И. В. Назимко // Вісник КТУ. – 2006. – Вип. 5(15). – С. 41 – 45.
9. Заложить наблюдательные станции, провести инструментальные наблюдения за деформациями земной поверхности при дискретном характере процесса сдвижения и при разработке пластов на большой глубине: отчет о НИР (промежуточный): 0205 / Украинский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ); отв. исполн.: Чепенко Л.П. [и др.]. - 1977. – 113 с.
10. Agioutantis Z. Developing improved methods of predicting surface displacements due to underground mining through the integration of empirical indices into numerical modeling / Z. Agioutantis, M. Karmis // Mining Science and Technology. – 1988. – 7. – Pp. 133-148.
11. Колбенков С.П. Способы расчета деформации земной поверхности в угольных бассейнах и практическое их использование в маркшейдерском деле / С.П. Колбенков // Труды Всесоюзного научно-технического совещания по маркшейдерскому делу. – М.: Углетехиздат, 1958. - С. 251-264.