

УДК 622.1:622.83

М.Э. Гордиенко (нач. отдела)

Донбасская топливно-энергетическая компания, г. Донецк
Н.А. Колесник (канд. техн. наук), **Г.И. Козловский** (канд. техн. наук, доц.), **В.В. Назимко** (д-р техн. наук, проф.)
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
bugayovanatasha@mail.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДЕ- ФОРМАЦИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУ- ЖЕНИЙ

Современные методы оценки деформаций подрабатываемых зданий используют детерминированные подходы и не учитывают стохастический характер процесса сдвижения. Обнаружено, что разброс оседания и деформаций в 3 раза меньше на границе мульды по сравнению со значениями в центре мульды сдвижения. Разброс деформаций согласуется с нормальным законом на любом участке мульды, а границы доверительного интервала могут быть представлены параболической кривой. Предложен способ перехода от детерминированной оценки деформации к установлению вероятности разрушения здания в определенной части мульды. Вероятность повреждения объекта может быть определена как произведение вероятности реализации определенного уровня критической деформации здания и вероятности деформаций земной поверхности.

Ключевые слова: оседания и деформации земной поверхности, разброс, вероятность повреждения.

Введение. Проблема подработки земной поверхности и природных объектов, расположенных на ней, а также зданий и сооружений остается актуальной, несмотря на значительный прогресс в понимании сложного механизма взаимодействия подрабатываемой толщи коренных пород, наносов и сооружений. Сложность такого 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. Такие деформации могут быть достигнуты несколькими путями, а часто бесконечным числом путей нагружения, что определяет принципиальную неоднозначность решений с помощью моделей 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.

Основные запасы угольных месторождений разведаны до распада Советского Союза. При этом расстояние между разведочными скважинами колеблется от 200 до 500 м, причем механические характеристики вмещающих пород проводились только для непосредственных кровель и почв пластов и определены лишь в 15-20% скважинах. Проблема неопределенности усугубляется тем, что в основном испытаны условно мгновенные пределы прочности на одноосное сжатие в воздушносухом состоянии пород. Лишь 10-20% из этих испытаний проведены на предел прочности на растяжение. Кроме того, пределы прочности в водонасыщенном состоянии испытывались в 10-20 раз реже, чем на сжатие. Модуль деформации определялся только на редких скважинах. Это означает, что практически более 90% толщи, которая подрабатывается, остается неисследованной с точки зрения коли-

чественных оценок механических показателей прочности и деформируемости вмещающих пород. Специалистам приходится мириться с такой ситуацией, потому что испытания механических свойств вмещающих пород остаются весьма дорогостоящим. Именно поэтому механические свойства горных пород в подавляющем числе случаев принимают по названию пород, а в нормативных документах по определению расчетных показателей деформаций [2-4] просто не учитываются. Указанные обстоятельства значительно усиливают неопределенность результатов прогноза и расчета деформаций подрабатываемых зданий и сооружений.

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 [6]. Влияние трещиноватости массива на снижение его прочности в определенной степени учтено в нормативном документе [7], однако все геомеханические расчеты деформаций или сдвижений массива горных пород основаны на оценке детерминированных, средних или наиболее вероятных величин.

Так, например оседания η , горизонтальные сдвигения ξ , наклоны i , горизонтальные деформации ε и кривизну K земной поверхности рассчитывают согласно нормативным документам [2-4] и представляют в виде конкретных детерминированных кривых (рис. 1). Вместе с тем, натурные инструментальные наблюдения свидетельствуют о том, что фактические значения параметров сдвижений и деформаций существенно отличаются от расчетных (рис. 2, 3). Так среднеквадратическое отклонение η находится в пределах $\pm 30\%$, ξ , i , ε – $\pm 50\%$ и K – $\pm 100\%$.

Хуже то, что величины деформаций земной поверхности присутствуют в формулах, с помощью которых определяют приведенные деформации подрабатываемых объектов. В частности кривизна входит в такую формулу:

$$\Delta l_x = l \sqrt{m_\varepsilon^2 \varepsilon_s^2 + m_K^2 K_s^2 H^2} \quad (1)$$

где l – длина (ширина) здания (отсека), мм;

m_ε, m_K – коэффициенты условий работы, принимаемые в соответствии с таблицей 6.1 по [2];

ε_s – максимальные по абсолютной величине расчетные горизонтальные деформации от одной n -й горной выработки или суммарные на различных стадиях отработки лав и горизонтов;

K_s – расчетная кривизна от одной n -й горной выработки или суммарные на различных стадиях отработки лав и горизонтов, учитываемых при определении ε_s ;

H – высота здания от подошвы фундамента до верха карниза, м.

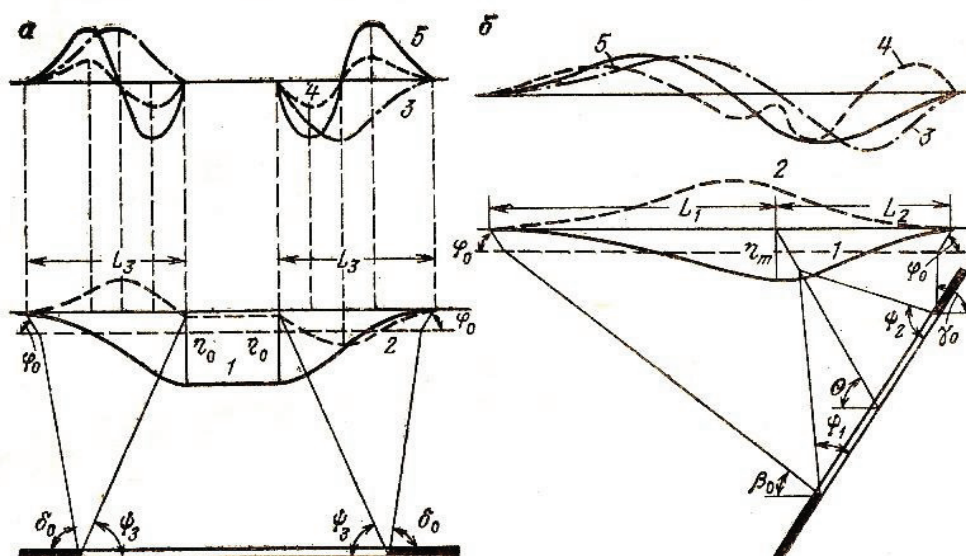


Рис. 1. Схема распределения сдвижений и деформаций в точках главных сечений мульды сдвижения при закончившемся процессе:

- а - на разрезе по простиранию; б - на разрезе вкрест простирания; 1 - оседания; 2 - горизонтальные сдвижения; 3 - наклоны; 4 - кривизна; 5 - горизонтальные деформации [2-4]

Это означает, что подставляя величину K в формулу (1), естественный разброс которой составляет 100% (и это всего лишь одно среднеквадратическое отклонение), значение приведенной деформации получаем с погрешностью порядка 70-100%.

Введение коэффициента перегрузки при вычислении расчетных деформаций не решает проблему неопределенности, по-

скільки величини розрахованих деформацій залишаються детермінованими і однозначними. Разом з тим розброс механічних властивостей вміщуючих підрабатуваний масив порід характеризується певним розподілом, яке для межі міцності і модуля деформації порід не суперечить логнормальному закону [10-12] і породжує аналогічний розброс деформацій товщі.

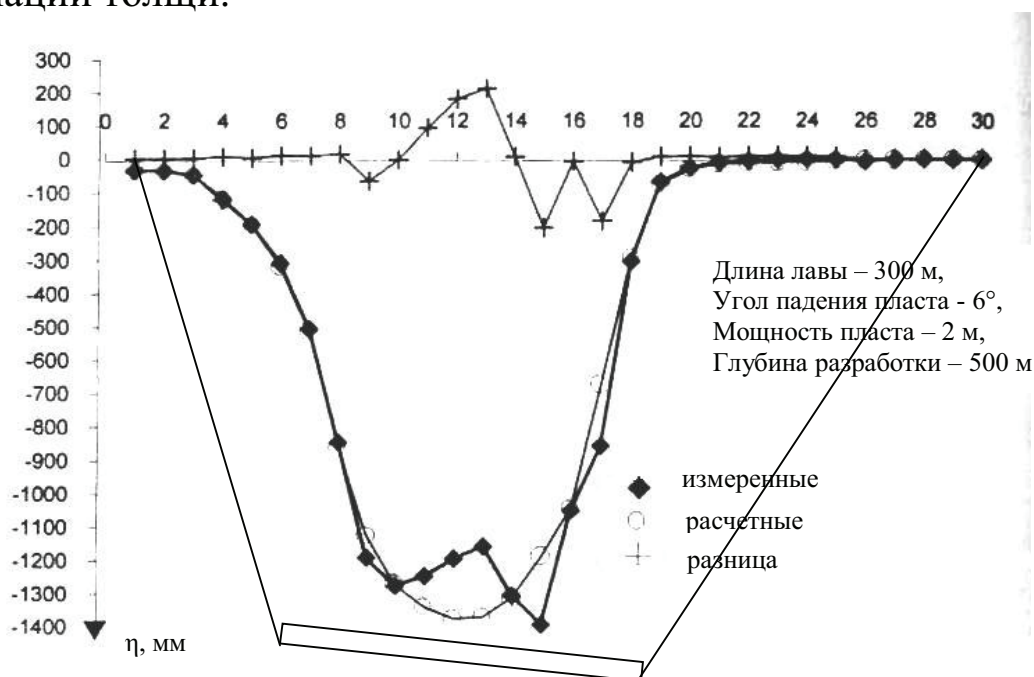


Рис. 2. Распределение измеренных и расчетных оседаний и их разница [8]

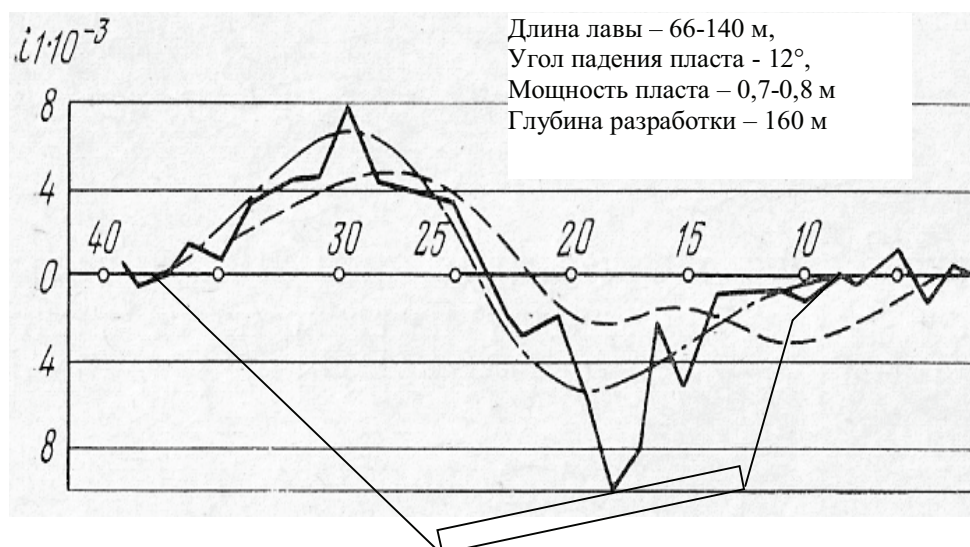


Рис. 3. График измеренных и расчетных наклонов земной поверхности [9]

Вопросами вариации фактических сдвижений и деформаций земной поверхности в свое время занимался ряд авторов [13-15], которые использовали механизм дискретности в качестве гипотезы, объясняющей разброс величин сдвижений и деформаций. Однако авторами не была дана количественная оценка размера разброса сдвижений и деформаций и закона его распределения.

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.

В данном документе предлагается для решения задач по разработке мер охраны подрабатываемых объектов использовать расчетные величины сдвижений и деформаций земной поверхности, определяемые с учетом ошибок положения зоны сдвижения на местности ΔL и коэффициентов перегрузки.

Вначале по описанной методике в районе объекта выбираются три точки зоны и определяются расчетные сдвижения и деформации в этих точках (рис. 4). 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. На рис. 5 приведен пример использования данной методики.

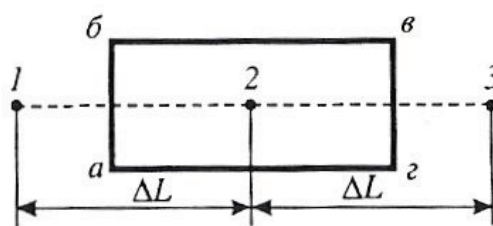


Рис. 4. Схема к определению расчетных деформаций в основании объекта абвг [3]

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 оседа-

ний 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.

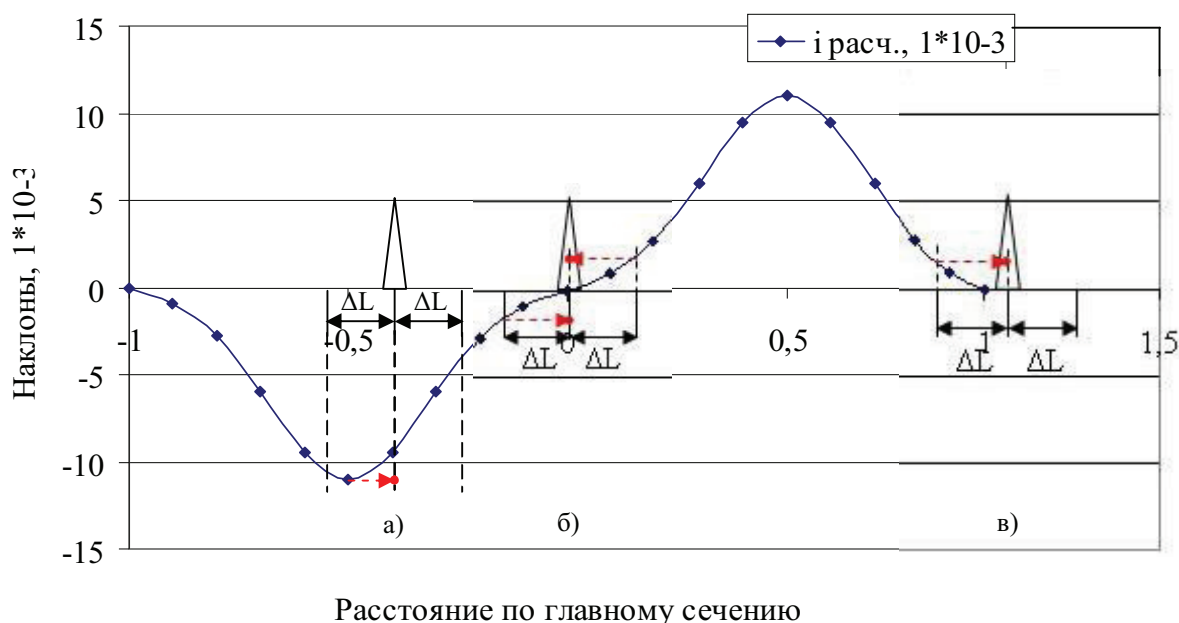


Рис. 5. Пример использования методики, описанной в [3]: для телемачты, расположенной в средней части полумульды (а); в центре мульды сдвижения (б); за границей мульды сдвижения (в).

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, 10-12] 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 макси-

мальны, причем на границах мульды разброс показателей деформаций не стремится к нулю (рис. 6-8).

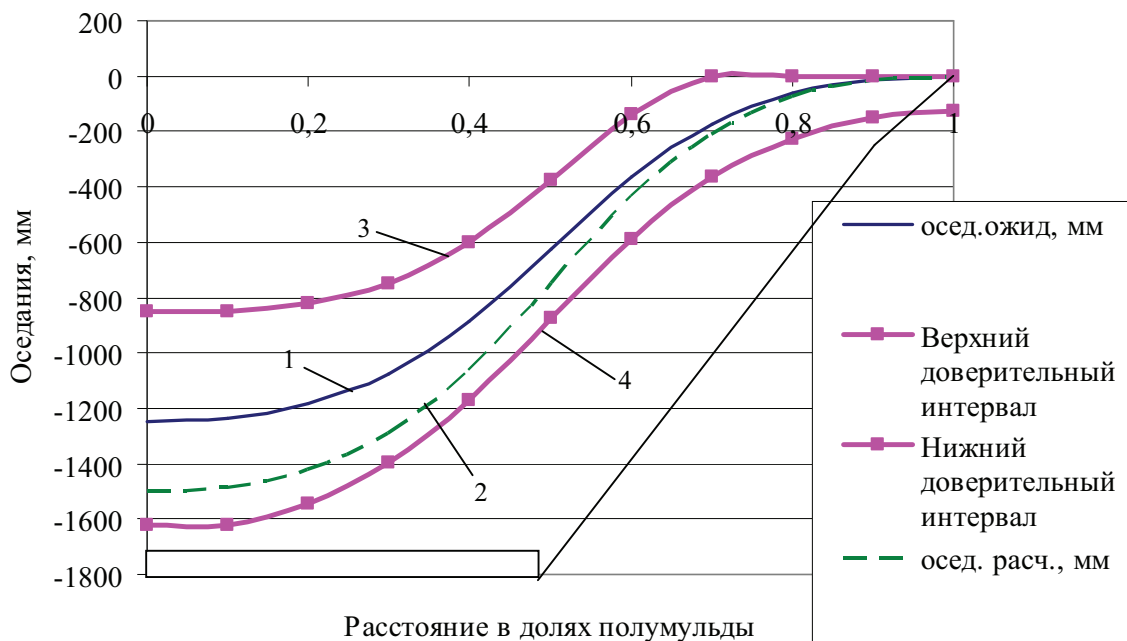


Рис. 6. График значений оседаний, рассчитанных по действующей [4] и предлагаемой методикам

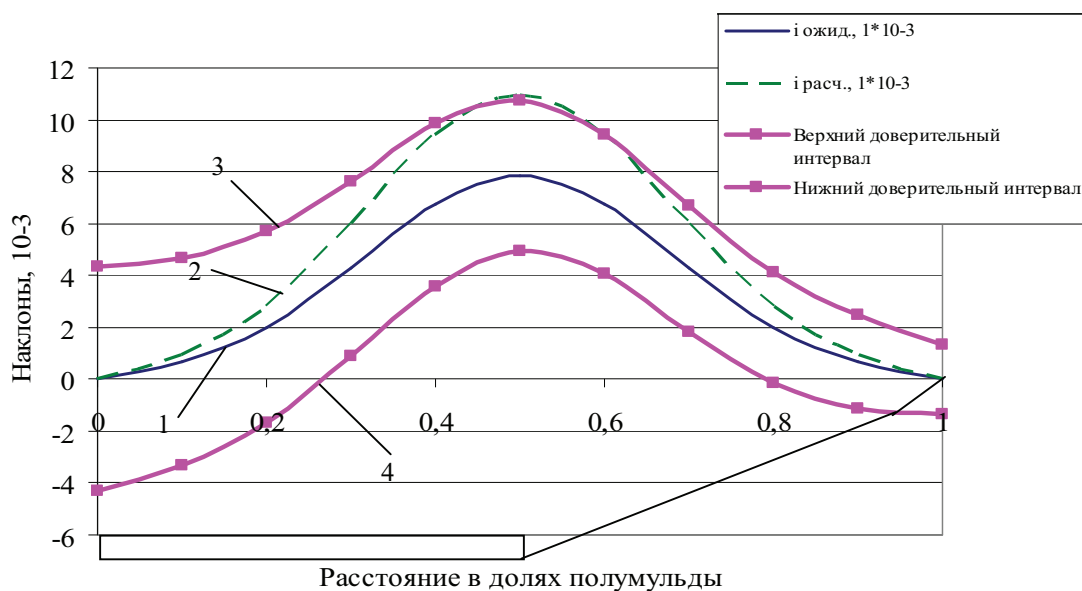


Рис. 7. График значений наклонов и горизонтальных деформаций, рассчитанных по действующей [4] и предлагаемой авторами методикам

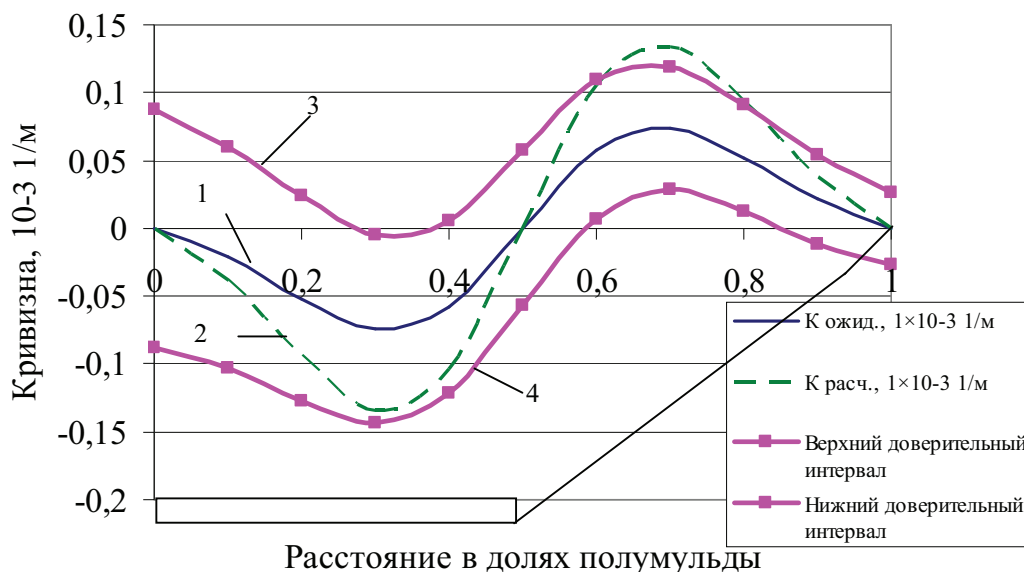


Рис. 8. График значений кривизны, рассчитанных по действующей [4] и предлагаемой методикам

Расчеты выполнены для типичных условий 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/м^3 , объемный вес 0,025 МН/м^3 .

По рисунку 6 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.

То же самое наблюдается для наклонов и кривизны (рис. 7, 8). 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 полу-мульды, 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 [16]. Поэтому в случае, когда расчетные оседания по предлагаемой методике превышают вынимаемую мощность пласта, оседания принимают равными вынимаемой мощности (рис. 6).

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 натурных наблюдений (4 профильных линии собственного эксперимента и 16 наблюдатель-

ных станций других авторов). Пример генеральной выборки данных экспериментов по измерению оседаний показан на рис. 9.

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. 9). При этом границы доверительного интервала возможных отклонений от ожидаемой величины оседаний описываются параболическими зависимостями с максимумом в центре мульды.

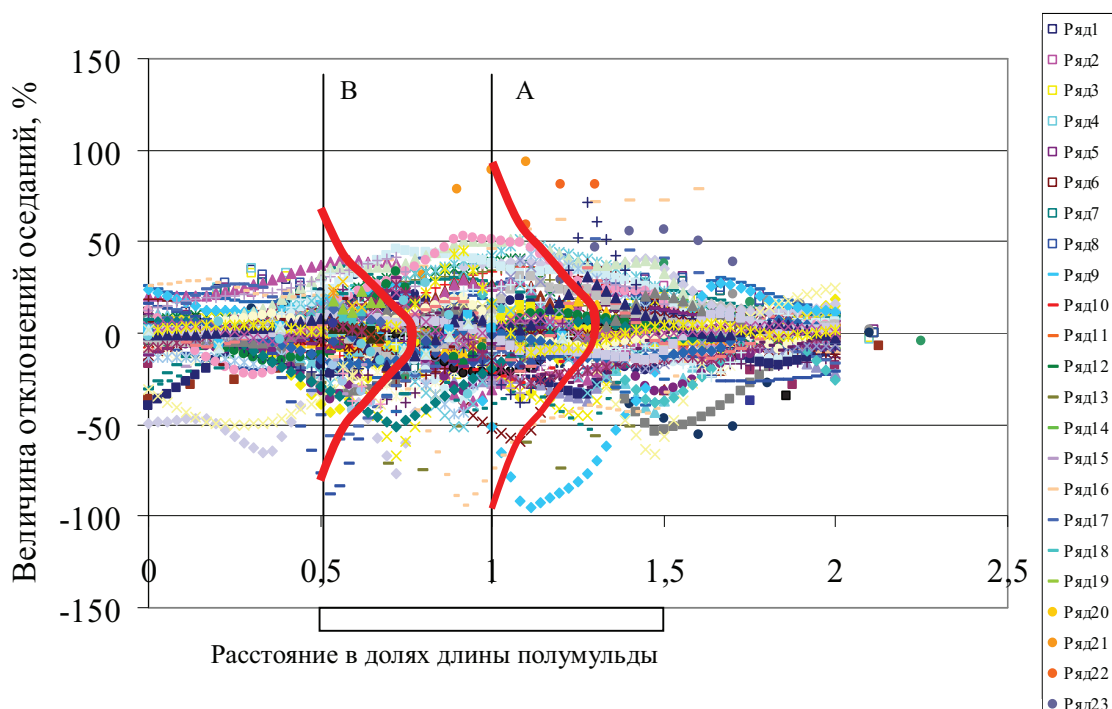


Рис. 9. Распределение отклонений оседаний земной поверхности, полученное при анализе результатов стохастического моделирования и результатов натуральных измерений

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. 10). Такое отклонение фактических длин полумульды сдвижений от ее расчетного положения получено на основании обработки результа-

тов 16 натуральных экспериментов, список которых приведен в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для построения гистограмм разброса границ мульды сдвижения

№ п/п	Наименование шахты	Средняя глубина разработки, м	Длина расчетной полу-мульды, м	Отклонение измеренной полу-мульды от расчетной, м	Отклонение измеренной полу-мульды от расчетной, %
1	«Куйбышевская» п/о «Донецкуголь» [17]	160	155	46	-29
2	«Куйбышевская» п/о «Донецкуголь» [17]	160	155	22	-14
3	«Куйбышевская» п/о «Донецкуголь» [17]	160	155	33	21
4	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	80	11
5	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	65	-9
6	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	161	-33
7	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	42	-6
8	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	77	-11
9	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	140	20
10	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	98	-14
11	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	63	9
12	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	77	-11
13	им. Горького п/о «Донецкуголь» [17]	620	700	161	33
14	им. газеты «Социалистический Донбасс» п/о «Донецкуголь» [17]	662	760	38	5
15	Американские восточные каменноугольные бассейны [18]	800	800	192	24

Продолжение таблицы 1

16	им. Капустина [9]	236	228	19	-8
17	им. Капустина [9]	236	228	19	-8
18	им. Капустина [9]	236	228	19	-8
19	им. Капустина [9]	236	200	58	-29
20	№1 «Центральная» [19]	135	150	10	-7
21	№1 «Центральная» [19]	135	150	5	3
22	№5-6 им. Димитрова [19]	170	186	24	13
23	№5-6 им. Димитрова [19]	170	186	18	10
24	№5-6 им. Димитрова [19]	140	240	14	6
Среднеквадратическое отклонение					17%

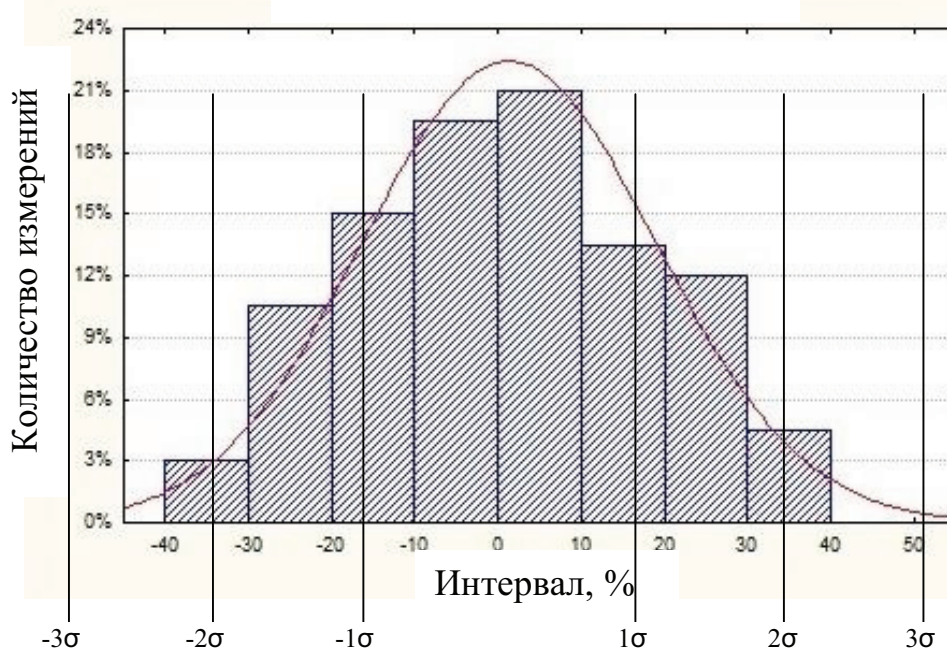


Рис. 10. Распределение разброса положения границы мульды сдвижений совместно по результатам компьютерного моделирования авторов и натуральных экспериментов других исследователей

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 [20].

Так среднеквадратическое отклонение естественного разброса предела прочности проволоки на разрыв, изготовленной из одного и того же металла в одной партии составляет 30%. Разброс прочности бетона и тем более железобетона еще больше, поскольку в процесс отвердения бетона на месте строительства часто вмешиваются дополнительные факторы, имеющие случайную природу (например погодные).

Существенное влияние на величину деформаций фундаментов зданий и сооружений, а также на их разброс оказывает процесс взаимодействия фундаментов с грунтами, на которых они возведены. Так в СНиП [21, табл. 1] приводятся допустимые предельные деформации оснований фундаментов зданий и сооружений в процессе их строительства и эксплуатации вне зоны влияния горных работ. Максимальная величина деформаций допускается для зданий с полным каркасом в виде стальных рам с заполнением бетоном. Чем меньше прочность и монолитность фундамента, тем более строгие требования предъявляются для величины допустимой деформации при усадке фундамента здания или сооружения. При этом в зависимости от конструкции здания и монолитности его фундамента величина предельно допустимой относительной разности осадок фундамента изменяется от 0,001 до 0,06, то есть в шесть раз, а относительный прогиб от 0,0007 до 0,0012 или почти в два раза.

Польские и канадские специалисты разделяют сооружения по сопротивляемости повреждению при их подработке горными работами на пять классов, а повреждаемость изменяется от 20 до 48 баллов [22]. При этом учитываются не только прочность и монолитность сооружения, но и свойства грунтовых оснований. Так наибольшей сопротивляемостью деформированию при подработке обладают новые сооружения, длина которых не превышает 10м, с квадратной формой в плане, с жесткой конструкцией (каркасом и фундамента), при строительстве которых заложены мероприятия по повышению прочности и устойчивости. При этом

минимальные повреждения сооружения происходят при подработке плоской равниной земной поверхности и сжимаемых грунтах основания зданий. Наоборот, подработка холмистой поверхности, представленной несжимаемыми грунтами, влечет за собой максимальные повреждения сооружений, которые усугубляются при их сильном износе, размере более 40м, вытянутой форме, нежесткой конструкции и построенных без применения специальных мероприятий.

Случайный характер повреждаемости сооружений после их возведения признается и специалистами, которые изучали процесс усадки оснований сооружений вне зоны влияния очистных работ [23, 24]. Очевидно, что в условиях влияния подработки масштабы этой неопределенности возрастут в несколько раз.

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. 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 2. Расчеты выполнены для типичных сооружений и конструкций при исходных условиях указанных в табл. 3-5. Очевидно, что уменьшение допустимых деформаций обусловлено не только повышением требований к устойчивости сооружений, но и признанием факта существенного влияния неопределенности.

Таблица 2

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	3,96	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	-	1,2	-
3. Подкрановые пути мостовых кранов в поперечном направлении	-	-	-	ε , $1 \cdot 10^{-3}$	-	-	3,5	-

Таблица 3

Характеристика дворца спорта

№ п/п	Параметры	Значение или наименование параметров
1	Этажность здания	1
2	Форма здания	Г-образная
3	Длина здания	80 м
4	Ширина здания	30 м
5	Размер Г-образных построек	20 м
6	Количество швов, разделяющих основной корпус здания на отсеки	1
7	Материал и толщина стен	Кирпич, 380 мм
8	Конструкция перекрытий	Железобетонные плиты
9	Износ стен	11-20%
10	Грунт под фундаментом здания	Плотные глины
11	Высота здания, от подошвы фундамента до верха карниза	11,5 м

Таблица 4

Характеристика кузнечного цеха машиностроительного завода

№ п/п	Параметры	Значение или наименование параметров
1	Этажность здания	1
2	Форма здания	Четырехугольная
3	Длина здания	90 м
4	Ширина здания	20 м
5	Конструкция здания	Каркасное, без связевого блока
6	Количество деформационных швов	2
7	Высота колонн	9 м
8	Состояние здания	Хорошее
9	Грунт под основанием здания	Плотные глины

Таблица 5

Характеристика мостовых кранов

Длина пролета, м	Высота колонн подкранового пути, м	Высота надкрановой части колонн, м	Направление подкранового пути
14	7	2	Параллельно длинной стороне здания

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 в виде криволинейной полосы 1 (рис. 6-8) с прямоугольной полосой 2 доверительного интервала допустимых предельных деформаций здания или сооружения (рис. 11). 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.

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. 11). 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. 11.

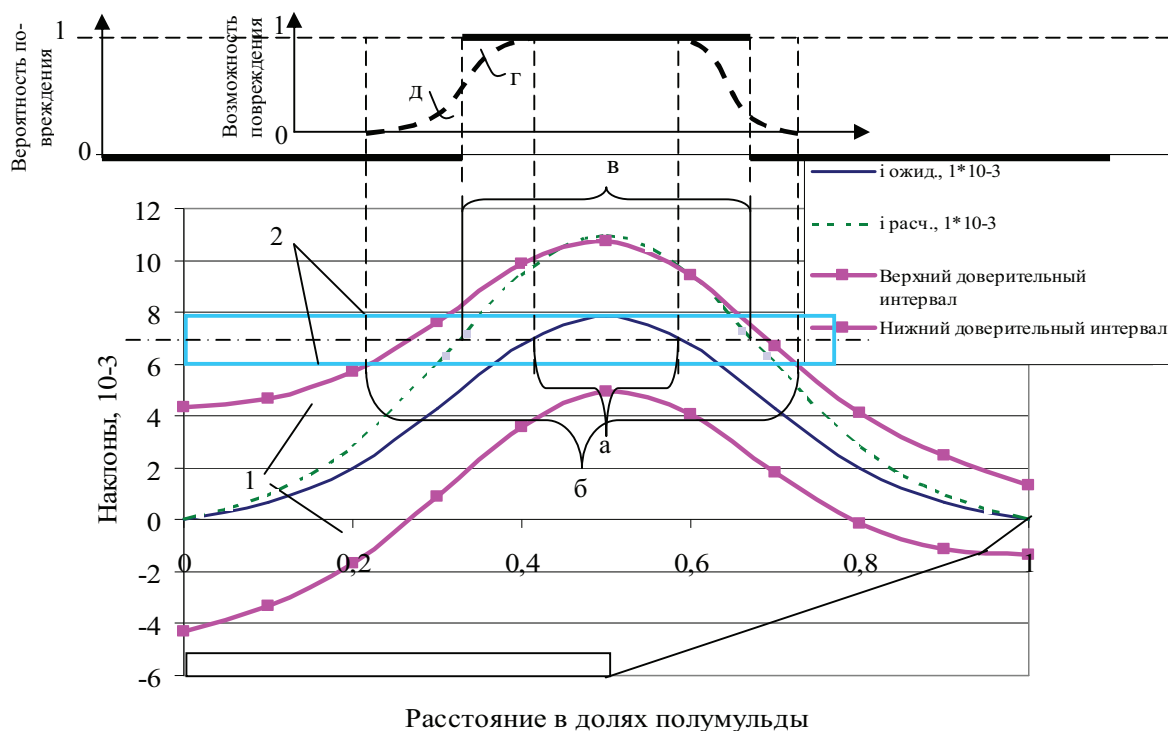


Рис. 11. Общая схема для определения границ доверительного интервала опасных деформаций

Строго говоря, даже на границах интервала Б вероятность повреждения сооружения не равна нулю, поскольку все параметры естественного разброса оседаний и деформаций земной поверхности введены в новую методику с одним среднеквадратическим отклонением. То же касается и коэффициента перегрузки [2-4], который также по умолчанию учитывает разброс величин оседаний и деформаций с одним СКО. Увеличение надежности прогноза интервалов повреждаемости сооружений до двух и тем более трех СКО повлечет непропорционально большие дополнительные расходы. Поэтому следуя традициям [2-4] остановимся на учете вероятности повреждения с одним СКО и перенормируем оставшийся диапазон вероятностей, представив условно границы интервала Б как такие, где вероятность повреждения сооружения пренебрежимо мала и за пределами которой применять специальные мероприятия по предотвращению негативных последствий подработки экономически нецелесообразно. Соответственно для корректности будем вместо вероятности использовать термин *возможность* повреждения.

Тогда сравнение традиционной и новой методики оценки возможности повреждения подрабатываемого сооружения показывает, что надежность новой методики существенно выше по сравнению с надежностью существующей. Так участок, отмеченный криволинейным треугольником (г) характеризует переоценку опасности повреждения традиционной методикой, а участок, обозначенный треугольником (д) – недооценку. В связи с этим расходы на применение мероприятий по нейтрализации негативных последствий подработки на участке (г) будут неоправданно завышены, в то время как вероятность повреждения объекта остается заметной для протяженного объекта и весьма значительной для сосредоточенного объекта, поскольку участок (д) остается полностью незащищенным. То же самое и с другой (правой на рис. 11) стороны опасного интервала подработки. Наоборот, новая методика позволяет рационально перераспределить ресурсы пропорционально возможности или риску повреждения подрабатываемого объекта по всей длине опасного участка. Для этого следует часть объема мероприятий на участке (г) уменьшить, и передать ее на участок (д). В итоге те же затраты на предотвращение возможных негативных последствий подработки сооружения будут перераспределены более 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. 11).

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. 12 и вычисляется по формуле (2), в которой эмпирические коэффициенты A , B , C принимаются из табл. 6 в строке 2:

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

где A , B , C - эмпирические коэффициенты;

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

Таблица 6

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

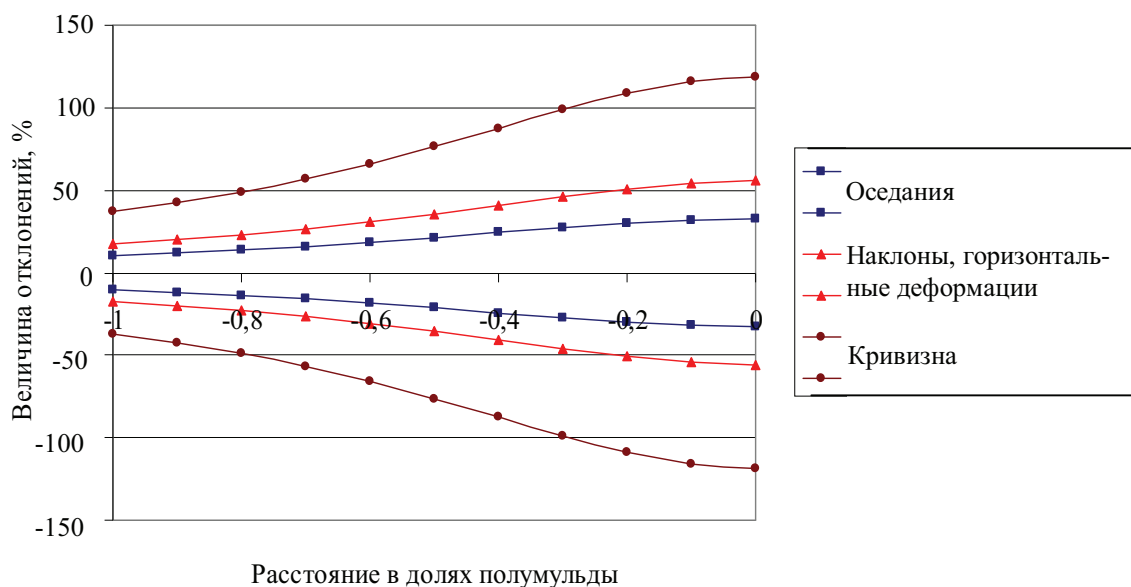


Рис. 12. Огибающие распределений величины разброса оседаний, наклонов и кривизны относительно ожидаемых

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 указанием [2-4] и СКО, равное 30% от среднего.

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. 11).

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. 11.

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 а единицу).

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

Пример использования новой методики. Предложенная методика использовалась при подсчете опасных деформаций в процессе подработке 1-й восточной лавой шахтоуправления им. Кирова комплекса весьма ответственных сооружений, состоящего из плотины шламоотстойника ООО «Силур», водоспускных сооружений, обводного канала, участка автомагистрали Донецк-Ростов и сливной трубы под автомагистралью. Условия подработки следующие: вынимаемая мощность составляет 1,2-1,25 м, угол падения пласта 9-10°, мощность наносов – 5 м. Уголь марки Т. Длина 1-й восточной лавы 220 м. Лава отрабатывается на глубине 140 м по сплошной системе разработки и примыкает к ранее выработанному пространству восточной коренной лавы, отработанной в 1997-1999 годах. Управление кровлей в лаве осуществляется полным обрушением. Согласно «Правилам подработки...» [4] для данного комплекса объектов опасными являются горизонтальные деформации растяжения, допустимый показатель которых равен $6 \cdot 10^{-3}$.

По описанной ранее методике вычисляем ожидаемые распределения горизонтальных деформаций по «Правилам подработки...» [4]. На рис. 13 данное распределение показано сплошной кривой линией 1. Далее согласно принятой методики вводим поправку в детерминированные величины горизонтальных де-

формаций. Границы доверительного интервала возможных деформаций земной поверхности показаны кривыми 2,3.

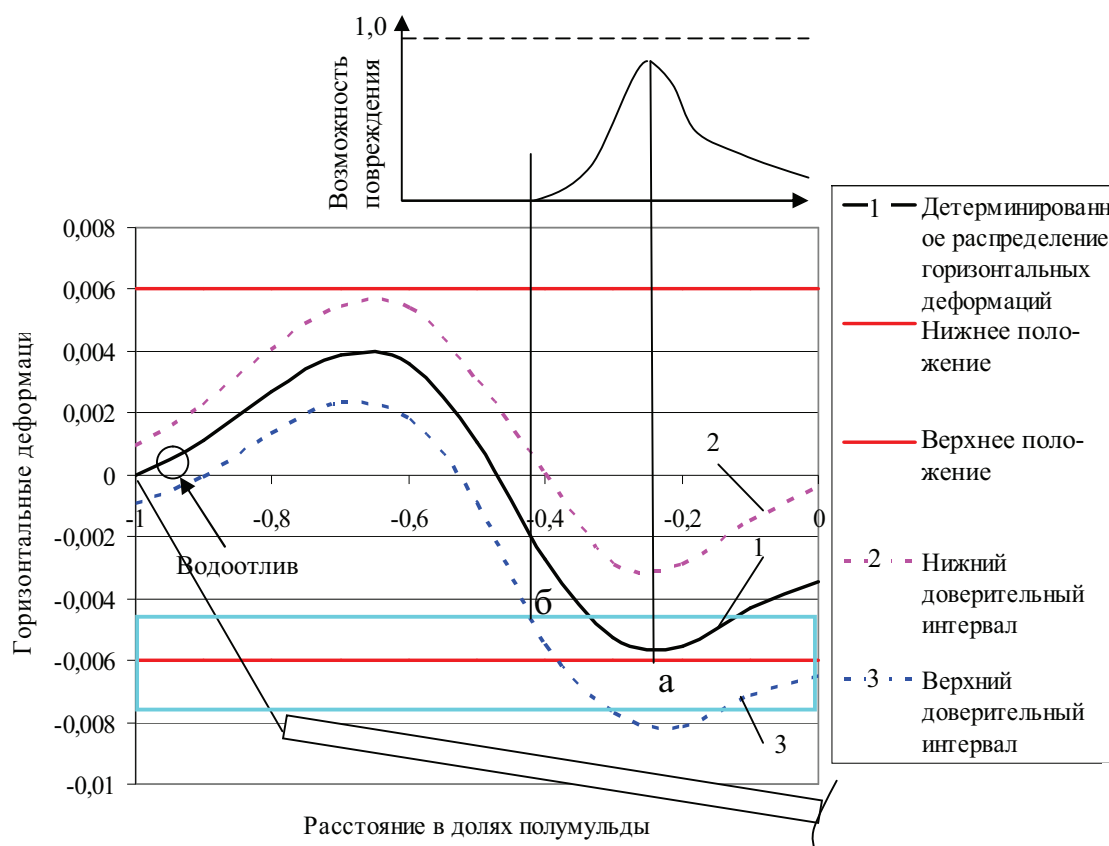


Рис. 13. Распределение горизонтальных деформаций в полумульде по «Правилам подрботки...» [4] и по предлагаемой методике

По рис. 13 видно, что при использовании «Правил подрботки...» горизонтальные деформации вдоль всей полумульды не превышают допустимых значений. Однако по предложенной авторами настоящей работы методике велика вероятность, что трасса будет разрушена в ходе ее подрботки на участке 0-0,4 длины полумульды. Максимальная возможность повреждения трассы составляет 95% и приурочена к точке А, которая отвечает участку, на котором кривая ожидаемых деформаций земной поверхности максимально приближается к наиболее вероятному значению предельной деформации основания автомобильной трассы. Возможность повреждения трассы становится пренебрежимо малой в точке Б, где заканчивается наложение доверительных интервалов (полос на рис. 13) возможных деформаций зем-

ной поверхности и допустимых величин деформации основания дороги.

В результате проведенных нами инструментальных наблюдений оказалось, что на подработанном участке автомагистрали возникли существенные деформации трассы и отбойников (рис. 14), что подтверждает достоверность разработанной методики.



Рис. 14. Результаты подработки трассы Донецк-Ростов

Целесообразно остановиться на распространенном ошибочном мнении специалистов о том, что применение коэффициента перегрузки обеспечивает необходимый и достаточный учет естественного разброса величин оседаний и деформаций. Во-первых коэффициент разброса не учитывает вероятность повреждения зданий и сооружений, которая, как показали примеры, приведенные в данной статье, существенно уточняет возможность повреждения сооружений. Во-вторых введение интервала неопределенности вместо коэффициента перегрузки позволяет учесть не только неопределенность величины деформации, но и ее знака. Учитывая, что предел прочности на растяжение для многих строительных материалов в несколько раз меньше предела на сжатие, неопределенность знака деформаций может приводить к заметному повышению вероятности повреждения сооружений на тех интервалах мульды, где знак деформации неопределен.

Таким образом, разработанную методику целесообразно использовать в практике ведения горных работ, а также учесть при дальнейшем совершенствовании нормативных документов.

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 сдвижений и деформаций возникает разброс, который нельзя полностью учесть введением коэффициента перегрузки. На сегодняшний день не установлена величина доверительного интервала разброса величин сдвижений и деформаций, а также положения границ мульды сдвижения.

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

3. Вариация ΔS величин сдвижений и деформаций земной поверхности над очистной выработкой пологого угольного пла-

ста 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.

6. Целесообразно учесть в нормативных указаниях и документах результаты исследований, опубликованные в данной статье.

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. Витке В. Механика скальных пород: [пер. с нем.] / В. Витке. – М.: Недра, 1990. – 439 с.
7. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. - Л.: ВНИМИ, 1985. – 222 с.
8. Schenk J. Dynamism of spatial displacements of points based on in-situ measurements and dependence on geomechanical properties of the roof / J. Schenk. - Poland, Cracow, 2000.
9. Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземных разработках / под общей ред. В.А. Букринского и Г.В. Орлова. – М.: Недра, 1984. – 247 с.
10. Бугаёва Н.А. Научные основы стохастического прогноза деформаций земной поверхности при ее подработке / Н.А. Бугаёва // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. «Гірничо-геологічна». - 2011. – Вип. 13 (178). – С. 63-69.
11. Бугаёва Н.А. Определение параметров деформаций земной поверхности по стохастическим мульдам оседания / Н.А. Бугаёва, Е.В. Яремчук, В.В. Назимко // Проблеми гірського тиску. – 2009. – Вип.17. – С. 192-225.
12. Бугайова Н.А. Геомеханічне обґрунтування параметрів зрушення земної поверхні неоднорідного породного масиву при відпрацюванні пологістих вугільних пластів.: авт. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.09 / Н.А. Бугайова. – Дніпропетровськ, 2012. – 22 с.
13. Земисев В.Н. Расчеты деформаций горного массива / В.Н. Земишев. – М.: Недра, 1973. – 144 с.
14. Медянецев А.Н. Учет погрешностей рассчитываемых сдвижений и деформаций земной поверхности над горными выработками с помощью коэффициентов перегрузки / А.Н. Медянецев, Ю.В. Посыльный // Маркшейдерское дело и геодезия: межвузовский сборник. - 1978. - Вып. 5. – С. 10-14.
15. Муллер Р.А. О статистической теории сдвижения горных пород и деформаций земной поверхности, вызываемых горными работами / Р.А. Муллер // Вопросы проектирования и защиты зданий и сооружений от влияния горных выработок. – М.: Центрогипрошахт, 1961. – С. 37-61.
16. 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.
17. Заложить наблюдательные станции, провести инструментальные наблюдения за деформациями земной поверхности при дискретном харак-

тере 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.

18. 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.

19. 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.

20. Регель В.Р. Кинетическая теория прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.И. Томашевская. - М.: Наука, 1975. – 560 с.

21. Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования: СНиП 2-15-74. - М.: Стройиздат, 1975.

22. Blachowski J. GIS-based methodology for assessing effects of mining on the surface infrastructure / J. Blachowski, A. Crzhanowski // XV Int. ISM Congress 2013. - Aachen, 2013. - Pp. 529-545.

23. Гуляев Ю.П. О точности математического описания процесса деформации основания фундамента / Ю.П. Гуляев // Геодезия и картография. – 1975. - №10. - С. 27-33.

24. Николаев С.А. Статистические исследования осадок инженерных сооружений / С.А. Николаев. - М.: Недра, 1983. – 112 с.

Стаття надійшла до редакції 13.10.2013

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук В.О. Назаренко

М.Е. Гордієнко

Донбаська паливно-енергетична компанія, м. Донецьк

Н.А. Колеснік, Г.Г. Козловський, В.В. Назимко

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙ БУДИНКІВ І СПОРУД, ЩО ПІДРОБЛЯЮТЬСЯ

Сучасні методи оцінки деформацій будівель, що підробляються, використовують детерміновані підходи і не враховують стохастичний характер процесу зрушення. Виявлено, що розкид осідання і деформацій у 3 рази менше на границі мульди в порівнянні зі значеннями в центрі мульди зрушення. Розкид деформацій узгоджується з нормальним законом на будь-якій ділянці мульди, а межі довірчого інтервалу можуть бути представлені параболічною кривою. Запропоновано спосіб переходу від детер-

мінованої оцінки деформації до встановлення ймовірності руйнування будівлі в певній частині мульди. Ймовірність пошкодження об'єкта може бути визначена як добуток ймовірності реалізації певного рівня критичної деформації будівлі та ймовірності деформацій земної поверхні.

Ключові слова: осідання та деформації земної поверхні, розкид, ймовірність пошкодження.

M.E. Gordienko

Donbass Fuel-Energy Company, Donetsk

N.A. Kolesnik, G.I. Kozlovsky, V.V. Nazimko

Donetsk National Technical University, Donetsk

DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR CALCULATION OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS DEFORMATION DURING THEIR UNDERMINING

Modern methods use deterministic approaches for assessment of undermining buildings deformation and do not account stochastic nature of destruction process. We found that dispersion of subsidence and deformation is 3 time less at the trough boundary in comparison to that at the center. Variation of deformations is in accordance with normal law at any section of the trough and confidence interval boundaries can be represented by a parabolic curve. We proposed to move from deterministic assessment of trough intervals to estimation of destruction probability at a certain part of the trough. Total probability of a building deformation can be defined as the product of probability of a certain level of critical deformation of a building and probability of ground deformation.

Keywords: subsidence and deformation of the earth's surface, variation, probability of deformation.