

ГЛАВА 12

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ

12.1. Основные параметры и термины

12.2. Зоны сдвижения пород

12.3. Факторы, влияющие на процесс сдвижения

12.4. Расчет ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности от одной очистной выработки по ее главным

12.5. Прогнозирование ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности над одиночной очистной выработкой

12.6. Расчет сдвижений и деформаций толщи горных пород

Выемка полезных ископаемых (угольных пластов, рудных залежей и т.п.) без закладки выработанного пространства нарушает начальное равновесное состояние вмещающих горных пород, в результате чего последние деформируются и сдвигаются. При больших выемочных площадях сдвигение пород достигает земной поверхности и она также претерпевает деформации. Сдвигения и деформации горных пород и земной поверхности при неблагоприятных горно-геологических условиях могут вызвать повреждения в объектах народно-хозяйственного комплекса, расположенных на земной поверхности и в горном массиве в зоне влияния подземных разработок. Они приводят также к увеличению водо- и газопроницаемости пород над и под выработанным пространством, что влечет за собой нарушение условий безопасного ведения горных работ, увеличение капитальных затрат на эксплуатацию подземных выработок, снижение нагрузок на очистные забои а также увеличение затрат в период консервации шахт, либо других подземных объектов.

Таким образом, необходимость решения проблем, связанных с процессом сдвигения и деформирования горных пород при ведении горных работ, возникает уже на стадии проектирования и остается актуальной в период эксплуатации и закрытия любого горнодобывающего предприятия.

12.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под **сдвигением горных пород и земной поверхности** понимают их деформирование и перемещение в результате нарушения равновесия пород под влиянием горных разработок или протекания различных иных физических процессов (тектонических, выщелачивания, водопонижения, изменения механических свойств пород при увлажнении или обезвоживании и других воздействиях на породный массив).

Сдвигение пород при подземных разработках начинается, как правило, с прогибов вышележащего, по отношению к разрабатываемому, нетронутого слоя пород. По мере увеличения площади выработанного пространства прогибы пород растут, в сдвигение вовлекается все большее число вышележащих слоев, происходит их сдвиг по плоскостям напластования, в толще появляются секущие трещины и трещины расслоения, при этом слои непосредственной кровли разби-

ваются, обычно по природным (кливажным) трещинам, на отдельные блоки и обрушаются.

Под влиянием горных работ в движение приходят также породы почвы, испытывающие поднятие и сдвиг по напластованию. Поднятие почвы и выдавливание ее в сторону выработанного пространства объясняется частичным или полным снятием с нее нагрузки от вышележащих пород и перераспределением горного давления в породном массиве.

Подрабатываемые породы кровли, теряя опору под зависшей частью, передают свой вес на краевые части пласта, вследствие чего происходит увеличение опорных нагрузок и возникновение **зон повышенного горного давления (зон ПГД)**.

В процессе сдвижения происходит изменение объема пород: в зоне ПГД породы уплотняются, а в зоне обрушения – разрыхляются. Разрыхленная порода, увеличиваясь в объеме, заполняет выработанное пространство и создает подпор вышележащим породным слоям.

Изменение напряженного состояния и, как следствие, сдвижение породного массива, вызываемые подземными горными работами, распространяются на значительные расстояния, нередко во много раз превышающие размеры выработок.

Областью сдвижения горных пород называют часть породного массива, подвергшуюся сдвижению под влиянием подземных разработок, а вовлекаемую в сдвижение часть земной поверхности – **зоной влияния горных разработок** или **мульдой сдвижения** (рис. 12.1).

Главными сечениями мульды сдвижения называются вертикальные сечения мульды по простиранию и вкрест простирания пласта, проходящие через точки с максимальным оседанием земной поверхности.

Границы мульды сдвижения на земной поверхности определяются **граничными углами**.

Граничными углами называются внешние относительно выработанного пространства углы, образованные на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды горизонтальной линией и линиями, соединяющими границы выработанного пространства с граничными точками сдвижения на земной поверхности, в качестве которых в настоящее время принимают точки со значениями оседаний 10-15 мм, наклонов или деформаций $0,5 \times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Различают граничные углы по простиранию - δ_0 , по падению - β_0 и по восстанию - γ_0 пласта или залежи, а также углы в наносах - φ_0 .

Значения граничных углов для Донецкого угольного бассейна равны $\delta_0 = \gamma_0 = 75^\circ$, $\beta_0 = 75^\circ - 0,8\alpha$, но не менее 25° (α - угол падения пласта), для Западного Донбасса $\delta_0 = \gamma_0 = \beta_0 = 65^\circ$, $\varphi_0 = 45^\circ$.

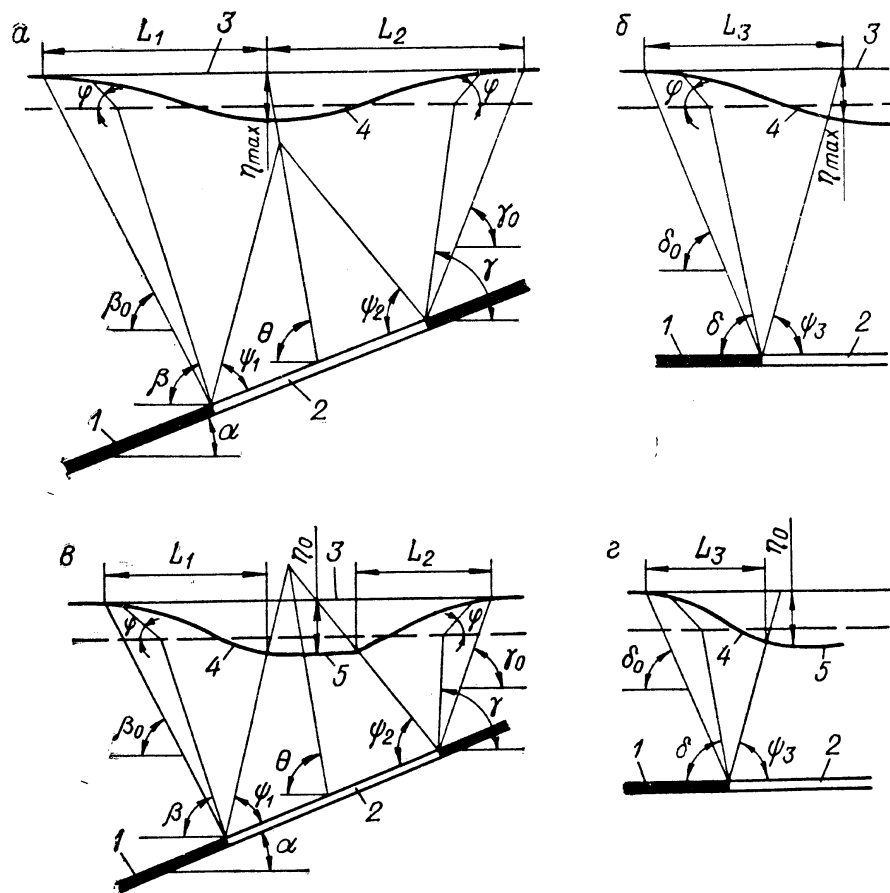


Рис. 12.1. Главные сечения мульды сдвижения вкрест простирания (а, в) и по простиранию (б, г) при неполной (а, б) и полной подработке (в, г): 1 - полезное ископаемое, 2 - выработанное пространство; 3 - земная поверхность до подработки; 4 - мульда сдвижения; 5 - участок с «плоским дном»

Углами сдвижения называются внешние относительно выработанного пространства углы, которые образуются при полной подработке на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды сдвижения горизонтальными линиями и линиями, соединяющими границы выработки с границей зоны опасного влияния на земной поверхности. В качестве границы опасной зоны в настоящее время принимают точки земной поверхности со значениями наклонов 4×10^{-3} , кривизны $0,2 \times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, деформаций растяжения 2×10^{-3} (при среднем интервале $15 \div 20$ м между точками).

Углы сдвижения в коренных породах обозначают: у нижней границы выработки β ; у верхней границы - γ ; по простиранию - δ . Углы сдвижения в наносах φ во всех направлениях одинаковы.

Значения углов сдвижения δ и γ для Донецкого угольного бассейна изменяются в зависимости от марки добываемых углей и степени подработанности от 80° до 85° , $\beta = 85^{\circ} - 0,8\alpha$, но не менее 30° , $\varphi = 60^{\circ}$. Для Западного Донбасса - $\delta = \gamma = \beta = 75^{\circ}$, $\varphi = 50^{\circ}$.

При определенном соотношении размеров выработанного пространства и глубины разработки в мульде сдвижения образуется **плоское дно**, т. е. участок с максимально возможными оседаниями. На этом участке сдвижения носят в основном равномерный характер.

Условия, при которых в мульде сдвижения образуется плоское дно, принято называть **полной подработкой** земной поверхности. Границы плоского дна определяются **углами полных сдвижений** – внутренними относительно выработанного пространства углами, образованными на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды плоскостью пласта и линиями, соединяющими границы выработки с границами плоского дна мульды сдвижения. Углы полных сдвижений обозначаются: ψ_1 – на разрезах по падению, ψ_2 – по восстанию у верхней границы выработки и ψ_3 – у ее границы по простиранию пласта.

При неполной подработке плоское дно не образуется. Положение точки на земной поверхности, имеющей максимальное оседание, определяется **углом максимального оседания** θ - углом со стороны падения пласта, образованным на вертикальном разрезе в главном сечении мульды вкрест простирания пласта горизонтальной линией, соединяющей середину очистной выработки с точкой максимального оседания при неполной подработке земной поверхности (рис. 12.1).

Оседанием называют вертикальную составляющую вектора перемещения точки поверхности и обозначают η .

Горизонтальным сдвижением называют горизонтальную составляющую вектора сдвижения и обозначают ξ (в направлении вкрест простирания) и ζ (по направлению простирания).

Неравномерность сдвижения горных пород вызывает деформации земной поверхности.

Для характеристики деформаций земной поверхности используют следующие параметры:

а) **наклоны интервалов в мульде сдвижения i** — отношение разности оседаний двух точек мульды к расстоянию между ними, или первая производная функции оседания;

б) **кривизна мульды сдвижения K_p** — отношение разности наклонов двух соседних интервалов мульды к полусумме длин этих интервалов; кривизна, или вторая производная функции оседания, характеризует неравномерность распределения наклонов в сечении мульды сдвижения;

в) **радиус кривизны мульды сдвижения** - величина, обратная кривизне мульды сдвижения, выраженная в метрах, $R_{Kp} = 1 / K_p$;

г) **относительные горизонтальные деформации в мульде сдвижения ε** - отношения разности горизонтальных сдвижений двух точек мульды к расстоянию между ними; при растяжении величина ε положительна, при сжатии - отрицательна; горизонтальные деформации характеризуют неравномерность горизонтальных сдвижений в мульде и определяются как первая производная функции этих сдвижений.

Общей продолжительностью процесса сдвижения называется период, в течение которого земная поверхность над выработанным пространством находится в состоянии сдвижения. Он делится на три стадии: начальную, интенсивную и затухания. Этот параметр используется при выборе мер охраны подрабатываемых объектов.

В зависимости от условий разработки, месторождения деформации толщи горных пород и земной поверхности носят либо плавный характер, вызывая на земной поверхности **мульду сдвижения** (рис. 12.2, а), или же сосредоточенный, с образованием на отдельных участках **трещин, провалов** (рис. 12.2, б) и **уступов** (рис. 12.2, в). Трещины и провалы на земной поверхности возникают, как правило, при горизонтальном и наклонном залегании разрабатываемых пластов, залегающих на небольших глубинах.

Параметры сдвижений и деформаций горных пород и земной поверхности при подземной добыче полезных ископаемых относятся к основным исходным данным, необходимым для проектирования и строительства подземных и поверхностных объектов в горнодобывающих районах.

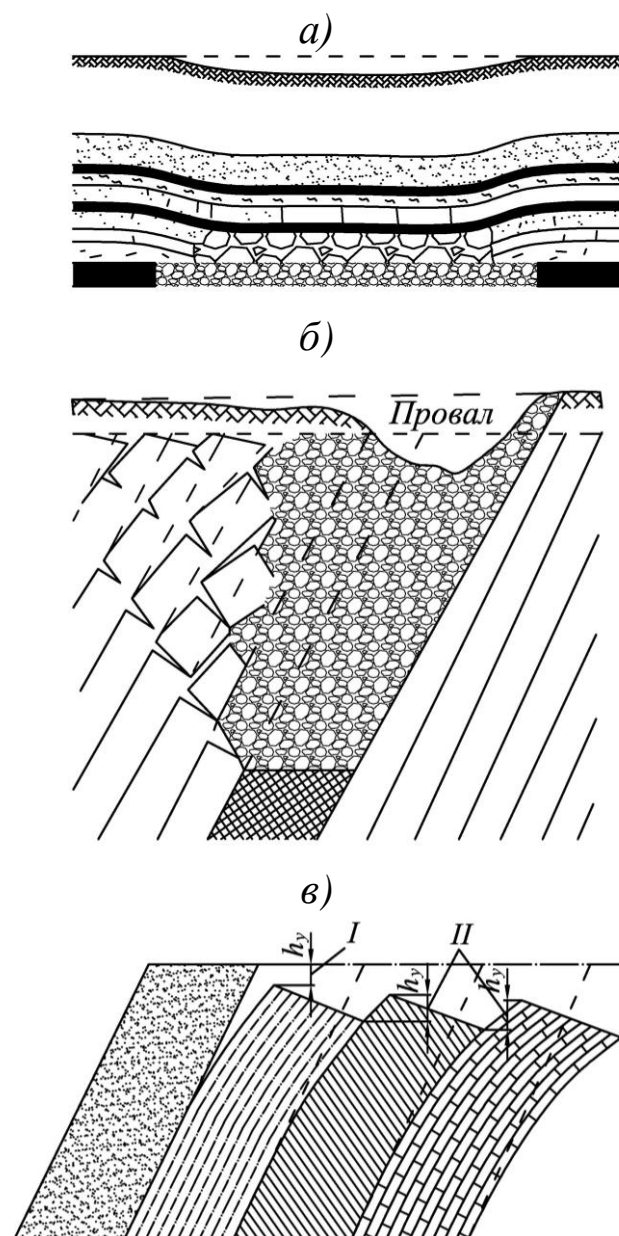


Рис. 12.2. Образование мульды сдвижения при разработке пологих пластов (а), трещин и провалов (б), уступов (в) при разработке крутопадающих пластов

На основании этих данных решают также вопросы планирования и ведения горных работ под застроенными территориями, реками и водоемами, вблизи стволов шахт, окоlostвольных выработок и других важных объектов.

Различают фактические сдвигения и деформации, а также измеренные, ожидаемые и расчетные.

Под **фактическими** сдвигениями и деформациями понимают такие, которые в действительности претерпели горные породы и земная поверхность под влиянием выемки полезного ископаемого.

Измеренными называют деформации, полученные по данным натуральных наблюдений на конкретном участке месторождения при определенной длине интервалов, частоте и точности наблюдений.

Измеренные деформации могут существенно отличаться от фактических за счет их искусственного «сглаживания», если расстояние между реперами соизмеримо с размерами (или больше) блоков, на которые разбивается породный массив при подработке, а частота наблюдений не соответствует скорости и характеру развития процесса.

Ожидаемые деформации определяют путем предрасчета по формулам, таблицам или графикам, составленным на основании обобщения результатов наблюдений за сдвижением в данных горнодобывающих районах.

Коэффициентами перегрузки принято называть отношение максимальных измеренных значений деформаций к ожидаемым.

Расчетные деформации получают путем умножения ожидаемых деформаций на коэффициенты перегрузки. Этот вид деформаций обычно используют при проектировании конструктивных или других мер защиты подрабатываемых объектов.

В действующем нормативном документах [191] приняты следующие значения коэффициентов перегрузки: для оседаний и горизонтальных сдвижений 1,1-1,2; для наклонов и относительных горизонтальных деформаций 1,2-1,4; для кривизны 1,4-1,8.

12.2. Зоны сдвижения пород

В настоящее время существует несколько схем выделения (определения) зон сдвижения горных пород. Так, в работе [192] в условиях пологого падения разрабатываемого пласта в толще горных пород, подвергшейся влиянию горных работ, по характеру и степени деформирования выделяется шесть зон сдвижения, а для условий наклонного и крутого залегания пластов и жил – появляется седьмая зона (рис.12.3): *I* - обрушения; *II* - водопроводящих трещин; *IIa* - максимальных трещин расслоения и сдвига крупных блоков; *III* - плавного прогиба; *IV* и *VI* - опорного давления соответственно над и под целиком; *V* - разгрузки; *VII* - сдвига пород по напластованию; *1* - угольный пласт; *2* - земная поверхность до разработки пласта, *3* - земная поверхность после сдвижения и деформирования пород; *4* - слои пород.

Четыре из них (*I÷IV*) находятся в вышележащей (подрабатываемой) толще, две (*V÷VI*) — в нижележащей (надрабатываемой) толще. В зоне *I*, расположенной непосредственно над очистной выработкой, породы наиболее деформированы и разделены на отдельные блоки. Она обычно носит название **зоны обрушения**.

В практике горного дела высоту зоны обрушения принимают обычно равной $(3÷6) m$, где m — вынимаемая мощность пласта. Высота этой зоны зависит от степени метаморфизма горных пород кровли разрабатываемого пласта.

Зона *II* характеризуется появлением в прогибающихся слоях нормально секущих трещин и трещин по напластованию, образующих системы газо-проводящих и водопроводящих каналов по нормали к напластованию пород.

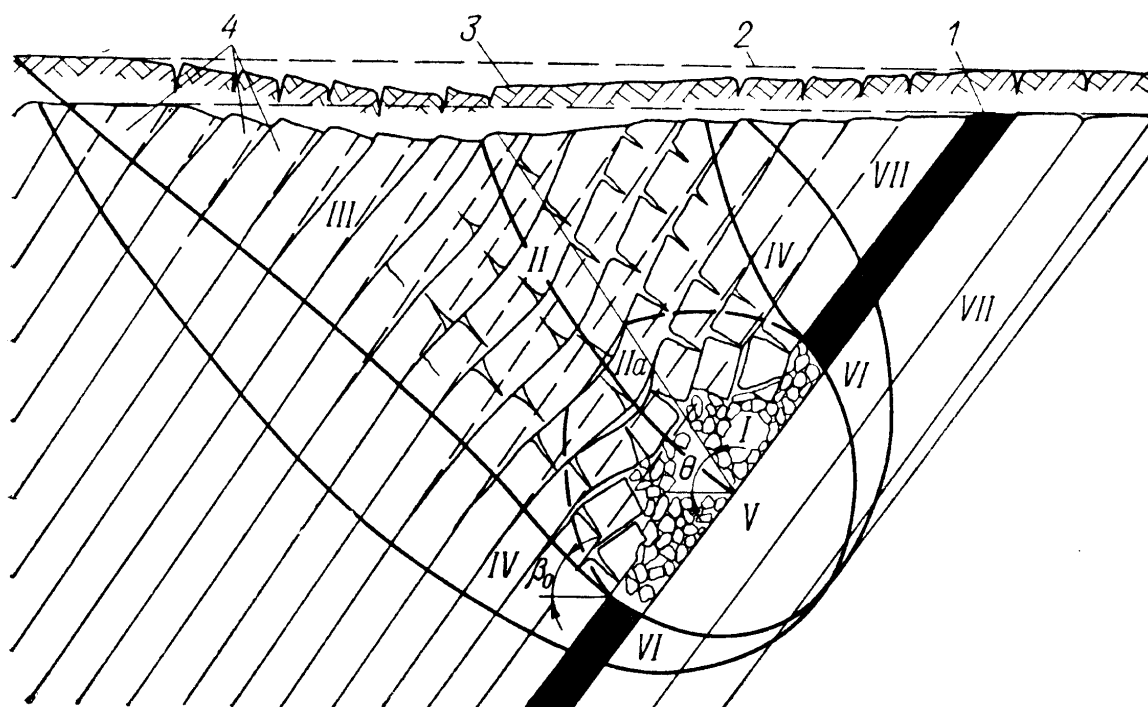


Рис.12.3. Схема образования зон сдвижения при разработке пласта крутого падения

Высота этой зоны, которую принято называть **зоной трещин**, колеблется обычно в пределах $(30÷50) m$ для водопроводящих и $(90÷120) m$ для газо-проводящих трещин.

В нижней части зоны *II* располагается участок с максимальным развитием трещин расслоения, которые вначале прослеживаются у границ выработки, а по мере удаления вверх по нормали от нее при-

ближаются друг к другу и сливаются в одну или несколько сплошных полостей расслоения.

Для зоны *III* характерен плавный прогиб пород. Отдельные трещины, образующиеся в этой зоне, не сообщаются между собой в направлении, нормальном к напластованию, и, как правило, не представляют опасности с точки зрения проникновения по ним воды в горные выработки, однако в пределах $(90\div 120)$ м этой зоны являются путями движения газа в выработанное пространство. Эту зону именуют **зоной плавного прогиба**. Она распространяется обычно до земной поверхности.

Зоны *IV* и *VI* характеризуются повышенными по сравнению с остальным массивом напряжениями и деформациями сжатия в вертикальном направлении и носят название **зон опорного давления**.

Зона *V* расположена под выработанным пространством и носит название **зоны разгрузки**. В ней наблюдаются деформации растяжения пород в вертикальном направлении. Эта зона характерна развитием в ней газопроводящих каналов на глубину $40\div 50$ м.

Участки зон *III* и *IV*, прилегающие к земной поверхности, иногда выделяют в отдельную зону. В этой зоне могут образоваться трещины разрывов, выходящие на земную поверхность вблизи границы мульды сдвижения.

В зависимости от условий разработки, способов управления горным давлением и других влияющих факторов, число и местоположение зон может отличаться от приведенной выше схемы.

Существенное влияние на характер сдвижения горных пород и земной поверхности оказывает угол падения пластов (жил), мощность наносов или меловых отложений, число разрабатываемых пластов или жил и т. д. При разработке свит крутопадающих пластов и жил преобладающим является прогиб пород в сторону выработанного пространства и сдвиг слоев по контактам.

В зоне *VII*, расположенной между зоной *IV* и земной поверхностью, основной формой деформирования массива является сдвиг пород по напластованию. При определенных условиях в этой зоне в сдвиге вовлекаются и породы лежачего бока, при этом в нее включается также область, расположенная между зоной *VI* и земной поверхностью. В результате сдвига слоев на земной поверхности и в наносах образуются упомянутые выше трещины и уступы, представляющие опасность для поверхностных объектов.

12.3. Факторы, влияющие на процесс сдвижения

В результате экспериментальных и теоретических исследований проявления процесса сдвижения земной поверхности и горных пород установлены основные факторы, влияющие на параметры процесса сдвижения.

Вынимаемая мощность пласта (залежи) и способ управления горным давлением относятся к числу основных факторов, определяющих высоту распространения зон сдвижения и деформации горных пород и земной поверхности. Установлено, что максимальные значения оседаний, деформаций и скоростей сдвижения находятся в прямой пропорциональной зависимости от вынимаемой мощности пласта (залежи). Все виды сдвижений и деформаций земной поверхности находятся в прямой линейной зависимости от вынимаемой мощности угольного пласта.

Угол падения пород является одним из основных факторов, определяющих угловые параметры процесса сдвижения и распределения деформаций в мульде. Чем он больше, тем положе углы сдвижения и граничные углы. С увеличением угла падения пластов возрастает отношение горизонтальных: сдвижений к вертикальным. Так, если при пологом залегании пластов горизонтальная составляющая сдвижения обычно не превышает половины вертикальной, то при угле падения 45° они равны, а при падении под углом 65° горизонтальная составляющая почти в два раза больше вертикальной. При небольших углах падения пластов (до 5°) мульда сдвижения симметрична относительно плоскости, проведенной через точку максимального оседания параллельно простиранию пласта.

Глубина горных работ оказывает существенное влияние на деформации земной поверхности, характер и степень проявления горного давления в толще. С увеличением глубины разработки все виды деформаций земной поверхности уменьшаются. Горное давление, наоборот, с увеличением глубины разработки повышается, концентрация деформаций и напряжений на отдельных участках становится более опасной.

Глубина ведения очистных горных работ влияет на размеры мульды сдвижения. Границы зоны влияния увеличиваются пропорционально глубине разработки.

Размеры выработанного пространства в сочетании с глубиной определяют степень подработанности земной поверхности. В услови-

ях полной подработки изменение размеров выработанного пространства не оказывает влияния ни на значения сдвижений и деформаций, ни на характер процесса сдвижения. Основным показателем, определяющим степень подработанности земной поверхности является соотношение размера выработанного пространства в рассматриваемом главном сечении D к глубине разработки H .

Скорость подвигания очистной выработки в значительной мере определяет продолжительность и интенсивность процесса сдвижения. Изменяя скорость подвигания, можно регулировать сроки и продолжительность отдельных стадий процесса сдвижения, что существенно при подработке объектов, в эксплуатации которых имеются перерывы.

Влияние скорости подвигания очистной выработки на процесс сдвижения исследовалось многими учеными на разных месторождениях и оценивается неоднозначно. Большинство исследователей [193-195 и др.] считают, что скорость подвигания очистного забоя не оказывает существенного влияния на величины деформаций земной поверхности, а увеличивает или уменьшает продолжительность и интенсивность процесса сдвижения.

При значительных скоростях подвигания очистного забоя (5 м/сут и более) впереди фронта горных работ возможно наличие поднятий массива и земной поверхности.

Целики в выработанном пространстве заметно влияют на распределение деформаций в мульде сдвижения. При удачном соотношении целиков и камер деформации горных пород могут не проявиться на земной поверхности, и наоборот, при неудачном соотношении над целиками происходит концентрация деформаций. В толще горных пород целики вызывают локальные повышения напряжений.

Механические свойства и структурные особенности горных пород, а также соотношение слабых и крепких пород в толще оказывают влияние как на процессы, происходящие в подрабатываемом массиве, так и на земной поверхности. В условиях подработки массива крепких горных пород процесс сдвижения происходит более дискретно, чем в породах низкой метаморфизации. Свойства горных пород оказывают влияние на угловые параметры процесса сдвижения, величины и характер распределения сдвижений и деформаций в мульде.

Тектонические нарушения оказывают существенное влияние на параметры процесса сдвижения. Однако из-за разнообразия амплиту-

ды и пространственного размещения нарушений относительно границ очистной выработки их влияние изучено недостаточно.

12.4. Математическое описание процесса сдвижения

В процессе сдвижения горных пород по представлениям различных авторов породные слои толщи деформируются подобно упругим, пластичным или сыпучим телам. Более того, в пределах даже одного слоя его поведение может быть описано любой из приведенных моделей. Поэтому создать универсальную математическую модель, удовлетворительно описывающую процессы, происходящие во всей породной толще, подвергшейся влиянию горных работ, чрезвычайно сложно, так как этот аппарат должен бы базироваться одновременно на законах деформирования упругой, пластической, сыпучей и других сред.

Одним из первых аналитическое описание мульды сдвижения предложил В.Ф. Галахов [196]. Он впервые выделил в полумульде сдвижения три характерные точки: начала мульды, максимального оседания и точку перегиба кривой оседания, делящей ее на две равные части. Проанализировав форму полумульды и различные аналитические кривые, В.Ф. Галахов предложил для расчета оседаний следующее выражение:

$$\eta_x = \eta_m(1 - x)^4 e^{-4x}, \quad (12.1)$$

где η_x - оседание земной поверхности в точке с координатой x (начало координат в точке с максимальным оседанием); η_m - максимальное оседание, e - основания натуральных логарифмов.

Впоследствии были предложены другие функции влияния, наиболее известными из которых являются следующие (табл.12.1).

Таблица 12.1

Вид функции влияния для расчета оседания земной поверхности

Автор	Функция влияния
С. Кноте	$\eta(x) = \eta_m \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi}{r^2} x^2},$ <p>где r – радиус влияния</p>
С.Г. Авершин	$\eta(x) = \eta_0 \left(1 - \frac{x}{2.13 \cdot l}\right)^{4.54} e^{-\frac{4.54x}{l}},$ <p>где η_0 – максимальное оседание земной поверхности; l – абсцисса точки перегиба</p>
Занн	$f(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-(2r \cdot \cos \alpha)^2}$ <p>где r – расстояние от элементарного объема до точки земной поверхности</p>
С.П. Колбенков	$S(z) = n^2 \left(1 - z + \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi z\right) + \frac{1 - n^2}{4} (1 + \cos \pi z^2),$ <p>где z – относительная координата точки, L – длина полумульды; n – коэффициент подработанности земной поверхности</p> $\eta(x) = 0.5\eta_0 \hat{O}\left(\frac{S_2}{cH}\right) \left[\hat{O}\left(\frac{S_1 + x}{cH}\right) + \hat{O}\left(\frac{S_1 - x}{cH}\right) \right]$ <p>где S_1, S_2 – расчетные размеры выработанного пространства, H – глубина разработки, c – коэффициент определяемый по результатам наблюдений</p>
Р.А. Муллер	$f(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi \cdot D \cdot y}} e^{-\frac{x^2}{4D \cdot y}}$ <p>где x, y – координаты рассматриваемой точки, D – коэффициент, характеризующий свойства массива</p>
В.И. Мякенький	$\eta(x) = \frac{\eta_m}{2} \left\{ \hat{O}\left[\frac{2\sqrt{2\pi}}{L} (D - d - x)\right] - \hat{O}\left[\frac{2\sqrt{2\pi}}{L} (d - x)\right] \right\},$ <p>где Φ – функция Гаусса, D – размер выработки, d – зависание пород кровли, L – длина полумульды.</p>

Важные особенности сдвижения горных пород, к которым относится гипотеза о зависимости между горизонтальной и вертикальной составляющими векторов сдвижения, базирующаяся на основе экспериментальных и теоретических исследований, были установлены акад. С.Г. Авершиным [197-199].

В общем виде эта гипотеза была представлена следующей зависимостью:

$$\xi = K(y) \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad (12.2)$$

где ξ и η - соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие вектора смещения; $K(y)$ - характеристическая функция, отражающая механические свойства пород.

Эту зависимость впоследствии использовали многие исследователи. С учетом уравнения неразрывности среды

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0, \quad (12.3)$$

она может быть преобразована в дифференциальное уравнение относительно вертикальной составляющей вектора сдвижений

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = K(y) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}. \quad (12.4)$$

Уравнение (12.4) является уравнением параболического типа (уравнение теплопроводности). Оно устанавливает аналогию вертикальных перемещений горных пород и закономерностей распространения тепла в неограниченном стержне. Такие уравнения хорошо изучены в математической физике.

Решение уравнения (12.4) для случая отработки одиночной лавы горизонтального пласта и плоской задачи акад. С.Г. Авершиным записано в виде:

$$\eta = -\frac{m}{2} \left[\Phi \left(\frac{S+x}{\sqrt{Ay}} \right) + \Phi \left(\frac{S-x}{\sqrt{Ay}} \right) \right]. \quad (12.5)$$

Здесь m - мощность пласта; Φ - интегральная функция Гаусса;

$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, где t - нормативная переменная; S - половина ширины очистной выработки; $A = K(y) = 0,2$; x, y - координаты точки земной поверхности.

Начало координат выбрано на середине ширины очистной выработки.

Несколько позже начали развиваться гипотезы и методы расчета, основанные на допущении аналогии между процессом сдвижения и стохастическими (статистическими) процессами.

Толчком для развития этого направления послужило полученное Е.А. Литвинишиным [200] и Р.А. Муллером [201, 202] параболическое уравнение состояния горного массива, принятое для описания поведения однородной осредненной плиты, изгибающейся под действием собственного веса, которое описывает статистические процессы.

Решение сводится к дифференциальному уравнению, подобному уравнению акад. С.Г. Авершина [197]

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = K \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = C^2 y \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}, \quad (12.6)$$

где C - коэффициент, зависящий от механических свойств вмещающих горных пород.

Конечное решение уравнения (12.6) получено в следующем виде:

$$\eta(\xi) = \frac{\eta_0}{2} \left[\Phi \left(\frac{D_p + x}{C_p H} \right) + \Phi \left(\frac{D_p - x}{C_p H} \right) \right], \quad (12.7)$$

где Φ – интегральная функция Гаусса; H - глубина разработки; η_0 - максимальное оседание; D_p – расчетный размер очистной выработки; C_p - осредненная расчетная величина, учитывающая мощность коренных пород и наносов.

Дифференцируя выражение (12.7), получена формула для определения наклонов в мульде на земной поверхности, а используя зависимость

$$\xi = -C^2 y \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad (12.8)$$

можно определить горизонтальные сдвижения

$$\xi(x) = \frac{\eta_0}{2C_p H} \left[\Phi' \left(\frac{D_2 + x}{C_p H} \right) - \Phi' \left(\frac{D_2 - x}{C_p H} \right) \right], \quad (12.9)$$

Полученные зависимости и их производные пригодны для описания сдвижений и деформаций земной поверхности в случае горизонтального залегания пластов.

Определению исходных параметров методов расчета сдвижений и деформаций земной поверхности была посвящены работы М.А. Иофиса [203], в которой на основе обработки результатов наблюдений процесса сдвижения во Львовско-Волынском угольном бассейне разработан способ определения значений неизвестных величин η_0 , C_p , входящих в конечное решение уравнения (12.7) и характеризующих состояние сдвигающегося массива:

$$C_p = 0,280 \pm 7,5\%; \quad \eta_0 = 0,7m. \quad (12.10)$$

В дальнейшем эти исследования М.А. Иофисом [204] были расширены с учетом наблюдений, выполненных в условиях Донбасса.

В результате выполненных расчетов и их анализа автором установлена следующая зависимость

$$C_p = 0,32 - 0,04 \frac{R_C}{\gamma H}, \quad (12.11)$$

где R_C - величина временного сопротивления пород сжатию; γ - объемный вес пород; H - глубина разработки.

Для математического описания процесса формирования мульды сдвижения В.И. Мякенький [205] использовал гипотезу С. Кнотте о единичном влиянии элементарного объема выработанного пространства.

В соответствии с этой гипотезой вынутый в пределах отработанной части пласта элементарный объем вызывает влияние на земной поверхности с образованием элементарной мульды сдвижения, оседания в которой являются функцией координат точки относительно координат элементарного объема (функцией влияния). Сумма влияний на оседание земной поверхности всех элементарных объемов, заключенных в пределах вынутой части пласта, определит оседания в мульде сдвижения. Установлен следующий вид функции влияния элементарного объема:

$$f(x, y) = \frac{4q_0 m}{L^2} \exp\left[-\frac{4\pi}{L^2}(x^2 + y^2)\right], \quad (12.12)$$

где q_0 - величина относительного оседания земной поверхности, которая для Донбасса равна 0,85, для Западного Донбасса 0,85-0,9.

В результате интегрирования функции влияния в пределах расчетных границ очистной выработки получено уравнение для определения оседаний в любой точке земной поверхности, заданной координатами (x, y) , в момент времени t для прямоугольной выработки с одной подвижной границей (левой) и условий горизонтального залегания пластов (начало координат выбрано посередине разрезной печи, ось x направлена в направлении движения лавы, ось y – вдоль лавы):

$$\eta(x, y, t) = \frac{q_0^m}{4} \left\{ \Phi \left[A(S_2 + y) \right] + \Phi \left[A(S_2 - y) \right] \right\} \times \left\{ \Phi \left[A(vt - d - x) \right] + \Phi \left[A(d - x) \right] \right\}, \quad (12.13)$$

где S_2 – расчетная ширина очистной выработки, $S_2 = S - d$; v – скорость подвигания забоя лавы; d – величина зависания пород основной кровли, м; D_2 – фактическая ширина очистной выработки, м, $D_2 = 2S$; $A = \frac{2\sqrt{2\pi}}{L}$, L – длина полумульды сдвижения при полной подработке, м; Φ – табличная интегральная функция Гаусса.

Использование формул (12.7), (12.13) для решения прикладных задач охраны подрабатываемых сооружений затруднительно вследствие сложности определения постоянных коэффициентов C , которые могут изменяться даже в пределах одного горнодобывающего региона. Для определения этих коэффициентов необходимо проведение сложных периодических инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности на типовых наблюдательных станциях. Вследствие этого для решения задач прогнозирования сдвижений и деформаций земной поверхности в странах СНГ используется метод типовых кривых.

12.5. Прогнозирование ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности над одиночной очистной выработкой

Расчет сдвижений и деформаций от одной очистной выработки в главных сечениях мульды сдвижения производят в соответствии с нормативной методикой, изложенной в «Правилах...» [206]. Условия применения данной методики следующие:

- известен календарный план развития горных работ;
- угол падения пластов от 0° до 70° ;

- кратность подработки

$$\frac{H}{m} > 2; \frac{H}{m} > 15 \text{ при } \alpha > 55^\circ;$$

- изменение угла падения пласта в пределах очистной выработки не более 10° ;

- очистная выработка имеет форму прямоугольника, стороны которого параллельны элементам залегания пласта;

- управление кровлей - полное обрушение или закладка выработанного пространства;

- закончившийся процесс сдвижения;

- отсутствие в пределах зоны влияния выработки разрывных и пликативных нарушений.

На вертикальных разрезах, проходящих через главные сечения мульды, с помощью граничных углов и угла максимального оседания (или углов полных сдвижений) находят границы полумульды сдвижения (рис.12.5).

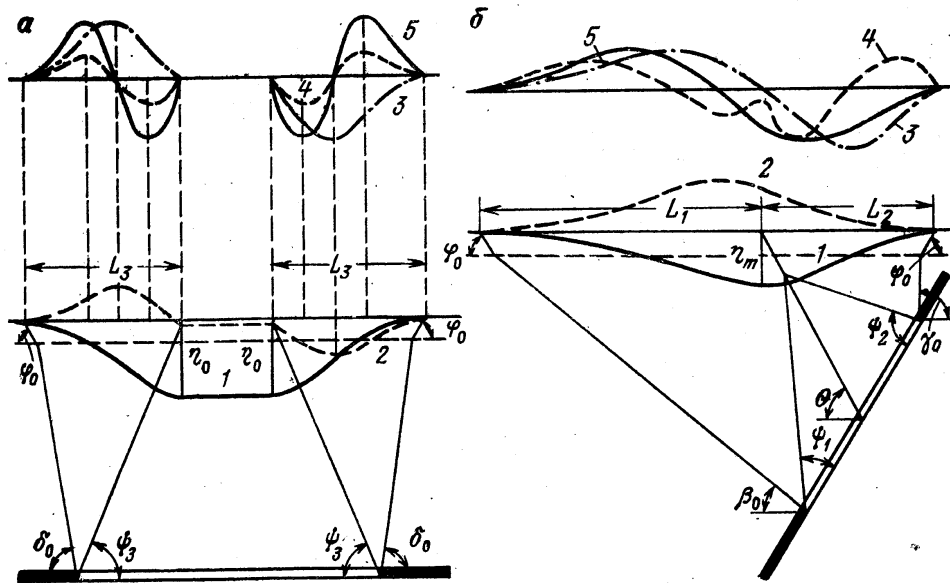


Рис. 12.5. Схема распределения сдвижений и деформаций в точках главных сечения мульды сдвижения при закончившемся процессе: *а* - на разрезе по простиранию; *б* - на разрезе вкрест простирания; 1 - оседания; 2 - горизонтальные сдвижения; 3 - наклоны; 4 - кривизна; 5 - горизонтальные деформации.

Максимальное оседание земной поверхности η_m следует вычислять по формуле:

$$\eta_m = q_0 m \cos \alpha N_1 N_2, \quad (12.14)$$

где q_0 - относительная величина максимального оседания, определяемая в соответствии с А.2.5.1 [206], безразмерная величина;
 m - вынимаемая мощность пласта или эффективная мощность пласта при работе с закладкой выработанного пространства, м;
 α - угол падения пласта в пределах очистной выработки, градус;
 N_1, N_2 - условные коэффициенты, характеризующие степень подработанности земной поверхности, соответственно вкрест простирания и по простиранию, безразмерные величины.

Коэффициенты N_1 и N_2 определяют по формулам:

$$N_1 = \sqrt{0,9 \cdot \left(\frac{D_1}{H} + \Delta D_n + \Delta D_\varepsilon \right)}, \quad (12.15)$$

$$N_2 = \sqrt{0,9 \cdot \left(\frac{D_2}{H} + \Delta D_{np} + \Delta D_{opr} \right)}, \quad (12.16)$$

где ΔD_n - поправка к относительной длине лавы за счет целика со стороны падения;

ΔD_ε - поправка к относительной длине лавы за счет целика со стороны восстания;

ΔD_{np} - поправка к относительной длине лавы за счет целика со стороны простирания;

ΔD_{opr} - поправка к относительной длине лавы за счет целика со стороны обратной простиранию.

Вычисление сдвижений и деформаций в любой точке мульды сдвижения следует выполнять по формулам в соответствии с табл. 12.2. Расположение координатных осей при расчете ожидаемых сдвижений и деформаций показано на рис. 12.6. Ось X совпадает с направлением простирания пластов, а ось Y направлена в сторону восстания. При вычислении сдвижений и деформаций в произвольном направлении угол λ следует отсчитывать от оси X (простирания) до заданного направления против хода часовой стрелки.

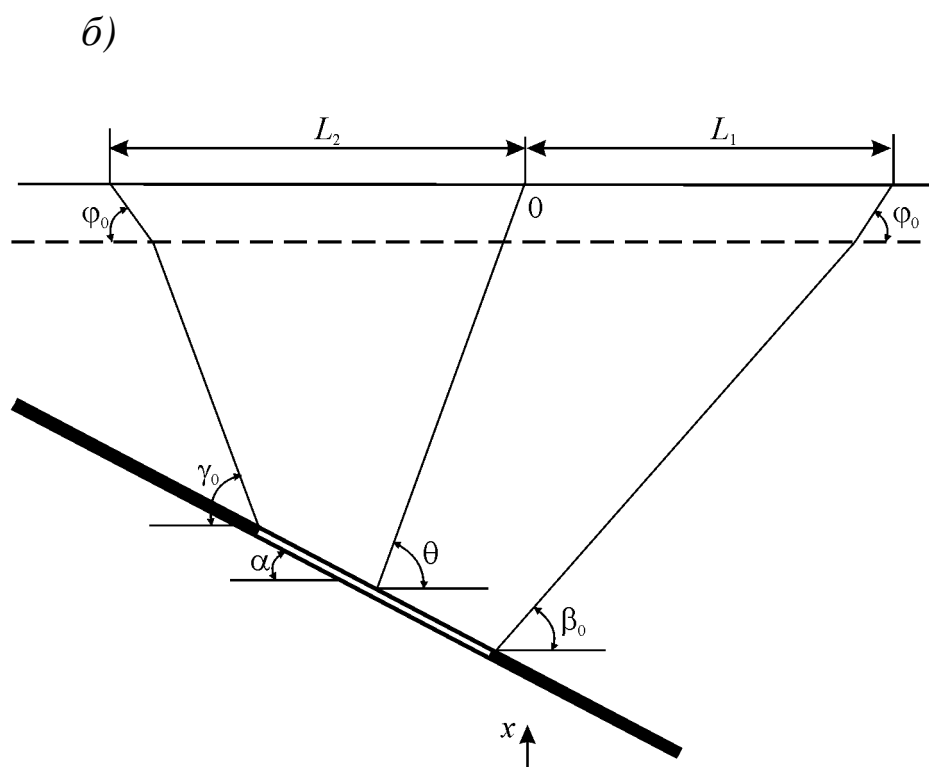
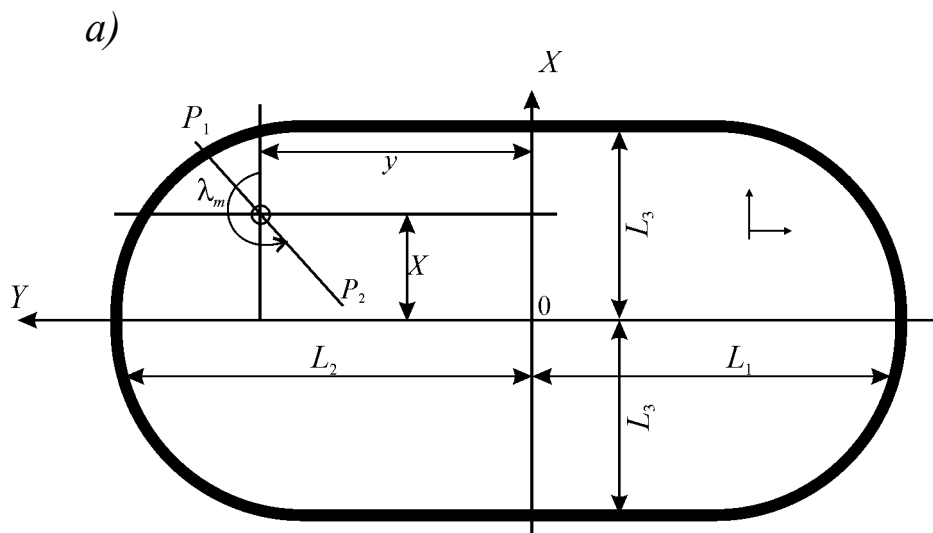
Значения функций $S(z)$, $S'(z)$, $S''(z)$ приведены в таблицах А.4 - А.6 [206] отдельно для донецкого и львовско-волынского бассейна. при вычислениях в условиях днепровского бурогоугольного бассейна значения функций следует принимать такими же, как и для донецкого бассейна.

Таблица 12.2

Формулы для расчета ожидаемых сдвижений и деформаций

Параметр	Направление	Обозначение	Формула
Оседание	-	η	$\eta = \eta_m \cdot S(z_x) \cdot S(z_y)$
Наклоны	простираание	i_x	$i_x = \frac{\eta_m}{L_3} S'(z_x) S(z_y)$
	вкрест простираания	i_y	$i_y = \frac{\eta_m}{L_{1(2)}} S'(z_y) S(z_x)$
	произвольное	i_λ	$i_\lambda = i_x \cdot \cos \lambda + i_y \cdot \sin \lambda$
Кривизна	простираание	K_x	$K_x = \frac{\eta_m}{L_3^2} S''(z_x) S(z_y)$
	вкрест простираания	K_y	$K_y = \frac{\eta_m}{L_{1(2)}^2} S''(z_y) S(z_x)$
	произвольное	K_λ	$K_\lambda = K_x \cos^2 \lambda + K_y \sin^2 \lambda + J \sin 2\lambda$
Скручивание	-	J	$J = \frac{i_x S'(z_y)}{L_{1(2)}}$
Горизонтальные сдвигения	простираание	ξ_x	$\xi_x = 0,5 \cdot a_0 \cdot \eta_m \cdot S'(z_x) \cdot S(z_y)$
	вкрест простираания	ξ_y	$\xi_y = 0,5 \cdot a_0 \cdot \eta_m \cdot F(z_y) \cdot S(z_x)$
	произвольное	ξ_λ	$\xi_\lambda = \xi_x \cdot \cos \lambda + \xi_y \cdot \sin \lambda$
Горизонтальные деформации	простираание	ε_x	$\varepsilon_x = 0,5 a_0 \frac{\eta_m}{L_3} S''(z_x) S(z_y)$
	вкрест простираания	ε_y	$\varepsilon_y = 0,5 a_0 \frac{\eta_m}{L_{1(2)}} F'(z_y) S(z_x)$
	произвольное	ε_λ	$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_x \cos^2 \lambda + \varepsilon_y \sin^2 \lambda + 0,5 \Delta s \sin 2\lambda$

Скашивание	-	Δ	$\Delta = \frac{\xi_x F(z_y)}{L_{1(2)}} + \frac{\xi_y S'(z_x)}{L_3}$
<p>$z = x / L$, где x – расстояние от точки максимального оседания в полумульде (начала координат) до рассматриваемой точки, м; L – длина полумульды по простираанию, падению или восстанению, м.</p>			



в)

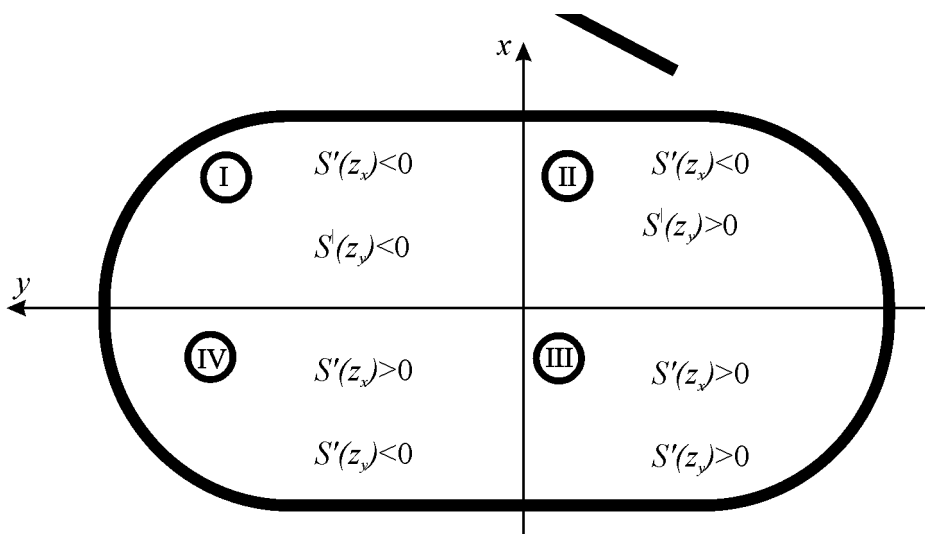


Рис. 12.6. Схема расположения координатных осей при расчете ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности

12.6. Расчет сдвижений и деформаций толщи горных пород

В настоящее время нет единой методики расчета параметров сдвижений толщи горных пород. Существующие методики разработаны, в основном, применительно к конкретным практическим задачам. Так, при выборе мер охраны вертикальных шахтных стволов главное внимание уделяют расчетам растяжений и сжатий горных пород в вертикальном направлении и определению искривления стволов, а при проектировании горных работ вблизи водных объектов - расчетам горизонтальных деформаций и определению зоны и размеров секущих трещин.

В большинстве существующих методик принято, что в толще горных пород слои перемещаются и деформируются над выработанным пространством (выше зоны обрушения) по тем же законам, что и на земной поверхности. При таком допущении расчет сдвижений по нормали к напластованию производят в каждом слое примерно так же, как и для земной поверхности: вначале определяют границы влияния горных работ и положение точек с максимальными сдвигами, т.е. размеры и местоположение полумульды, затем рассчитывают максимальное сдвижение. Ось Ox при таком

расчете направлена вдоль слоя. Изменение наклона и изгиб слоя определяют как производные от кривой нормальных сдвижений.

Основные трудности при расчете сдвижений по изложенной методике состоят в определении границ области влияния горных работ. Иногда эту область ошибочно оконтуривают линиями, проведенными от границ горных работ под углами сдвига или граничными углами, однако, указанные условные линии служат только для определения границ мульды сдвига на земной поверхности.

В толще пород граница влияния горных работ имеет сложное очертание и пересекает разрабатываемый пласт не у границы выработанного пространства, а в некотором удалении от нее. В первом приближении область влияния горных работ (над выработанным пространством) можно оконтурить прямыми линиями, соединяющими границы мульды сдвига на земной поверхности с границами зоны опорного давления, расположенной в плоскости пласта. Размеры зон опорного давления в плоскости пласта при пологом залегании пластов колеблются в пределах от $0,2H$ до $0,4H$.

В работе [207] приводится методика определения границ зон сдвига для однослойного и двухслойного подрабатываемого массива горных пород. Зона сдвижений в пределах разрабатываемого пласта рассчитывается с учетом размеров зон ПГД и влияния процесса сдвига пород на устойчивость крепи подготовительных выработок (рис.12.7).

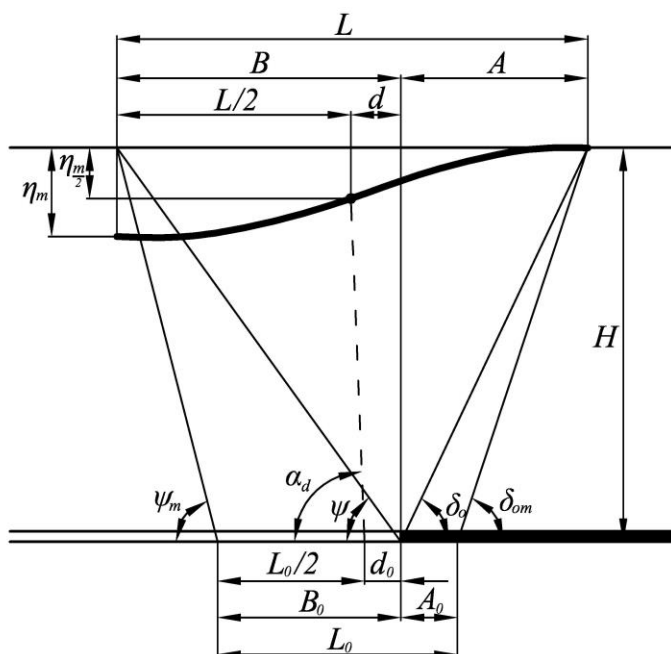


Рис.12.7. Схема формирования граничных угловых параметров процесса сдвига в однослойном массиве горных пород

Длина зоны сдвижения подрабатываемого слоя пород определяется из выражения

$$L_z = L_0 + z \left(\operatorname{ctg} \delta_{0m} + \operatorname{ctg} \psi_m \right), \quad (12.17)$$

где L_0 - длина полумульды сдвижения на горизонте разрабатываемого пласта; z - расстояние по нормали до рассматриваемого слоя горных пород; δ_{0m} - граничный угол массива горных пород; ψ_m - угол полных сдвижений подработанного массива.

Расчет сдвижений и деформаций слоев подрабатываемой толщи представляет собой сложную задачу. Для этих расчетов необходимо знать мощность пачек слоев, прогибающихся без расслоений, и положение нейтральной линии в каждой из этих пачек. Наиболее надежно указанные данные могут быть определены путем натуральных наблюдений в толще пород на рассматриваемом или соседнем участке, но эти наблюдения весьма трудоемки и их проводят редко. Обычно мощность пачек слоев, прогибающихся без расслоения, составляет (0,05-0,1) H и она редко превышает 20 м. Нейтральная линия располагается вблизи нижнего контакта каждой из указанных пачек. Значения сдвижений и деформаций вдоль слоев для решения ряда практических задач можно приближенно находить из выражений [207]:

$$\xi_{x,y} = \frac{y_1}{H} \eta_{\max} S(z); \quad (12.18)$$

$$\varepsilon_{x,y} = \frac{y_1}{H} \frac{\eta_{\max}}{L} S'(z), \quad (12.19)$$

где y_1 - расстояние до точки, в которой производят определение сдвижений и деформаций, от нейтральной линии пачки слоев, прогибающейся без расслоений.

Следует отметить, что функции горизонтальных сдвижений и деформаций в массиве непрерывны только в пределах пачки слоев, прогибающихся без расслоений, т.е. справедливы в пределах одной пачки. На контактах указанных пачек они имеют разрывы, т.е. нарушается условие непрерывности деформаций.

В последние годы все чаще стали применять методы расчетов, не требующие предварительного определения границ области влияния горных работ. К числу таких методов относится метод В.Н. Земисева, согласно которому значения сдвижений и деформаций в толще пород при небольших углах падения пластов предлагается определять по формулам [208]

$$\eta_{x,y} = \frac{k\eta_0}{2} \left[\Phi \left(\frac{D_1 - x + h}{\sqrt{yh}} \right) + \Phi \left(\frac{D_1 + x + h}{\sqrt{yh}} \right) \right]; \quad (12.20)$$

$$\xi_{x,y} = \frac{k\eta_0}{4} \left[\Phi \left(\frac{D_1 - x + y + h}{\sqrt{yh}} \right) + \Phi \left(\frac{D_1 + x - y_1 + h}{\sqrt{yh}} \right) \right] - \frac{k\eta_0}{4} \left[\Phi \left(\frac{D_1 - x - y_1 + h}{\sqrt{yh}} \right) + \Phi \left(\frac{D_1 + x + y_1 + h}{\sqrt{yh}} \right) \right]; \quad (12.21)$$

$$i_{x,y} = \frac{k\eta_0}{2\sqrt{yh}} \left[\Phi' \left(\frac{D_1 + x + h}{\sqrt{yh}} \right) - \Phi' \left(\frac{D_1 - x + h}{\sqrt{yh}} \right) \right]; \quad (12.22)$$

$$Kp_{x,y} = \frac{k\eta_0}{2yh} \left[\Phi'' \left(\frac{D_1 + x + h}{\sqrt{yh}} \right) + \Phi'' \left(\frac{D_1 - x + h}{\sqrt{yh}} \right) \right]; \quad (12.23)$$

$$\varepsilon_{x,y} = \frac{k\eta_0}{4\sqrt{yh}} \left\{ \left[\Phi' \left(\frac{D_1 + x - y_1 + h}{\sqrt{yh}} \right) - \Phi' \left(\frac{D_1 - x + y_1 + h}{\sqrt{yh}} \right) \right] - \left[\Phi' \left(\frac{D_1 + x + y_1 + h}{\sqrt{yh}} \right) - \Phi' \left(\frac{D_1 - x - y_1 + h}{\sqrt{yh}} \right) \right] \right\}; \quad (12.24)$$

где $k\eta_0$ - максимальное оседание слоя пород над зоной обрушения (коэффициент k определяют опытным путем; при отсутствии опытных данных его принимают равным единице); h - средняя мощность деформирующихся без расслоений слоев толщи; y - расстояние от верхней границы зоны обрушения до рассматриваемого пласта; y_1 - расстояние от нейтральной линии слоя до рассматриваемой точки этого же слоя; $D_1 + h$ - расчетный размер выработки, который вычисляют из выражения

$$D_1 + h = D_0 - \left[\frac{(D_0 - a)}{H} \right] y; \quad (12.25)$$

D_0 - расстояние в плоскости пласта от середины выработки до точки перегиба первого слоя над зоной обрушения:

$$D_0 = D - \frac{l}{2}; \quad (12.26)$$

$2D$ - размер выработанного пространства; l - шаг посадки слоев основной кровли над зоной обрушения; a - расстояние в плоскости пласта от точки перегиба мульды сдвижения на земной поверхности до середины выработки.

При неизвестном l значение $D_1 + h$ можно принимать равным a .

В работе [209] с применением функции влияния единичного объема выработанного пространства получено уравнение оседаний подрабатываемой толщи горных пород в точке с координатами (x, y, z) , в котором в качестве исходного параметра входит длина полумульды сдвижения подрабатываемого слоя пород [207]

$$\eta(x, y, z, t) = \frac{\eta_0}{4} \left\{ \Phi \left[\frac{5,013}{L_z} (vt - d - x) \right] - \Phi \left[\frac{5,013}{L_z} (d - x) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ \Phi \left[\frac{5,013}{L_z} (S_2 + y) \right] + \Phi \left[\frac{5,013}{L_z} (S_2 - y) \right] \right\}, \quad (12.27)$$

где L_z - длина полумульды сдвижения подрабатываемого слоя горных пород.

Данный подход позволяет определять параметры сдвижения подрабатываемого слоя, величины горизонтальных деформаций слоя с учетом его мощности и положения нейтральной линии.

12.7. Распределение газового давления в зонах сдвижения горных пород

Горный массив, включающий угольные пласты и пропластки, содержит в сорбированном состоянии газ метан под давлением в 10-50 МПа. Газоносность этих пластов доходит до 35-40 м³/тонну.

Процесс сдвижения горных пород при очистной выемке каменного угля приводит к разгрузке, деформированию, нарушению сплошности, образованию трещин во вмещающем породном массиве и интенсивному дренированию на добычные участки газа из под- и надрабатываемой толщ. Количество газа, поступающего на добычные участки, по калорийности часто превышает калорийность добываемого угля, а на его проветривание в шахты подается 10-20 тонн воздуха с поверхности и тратится по самым скромным подсчетам более 5% электроэнергии страны. Осуществление подачи в шахты

такого количества воздуха требует содержания большой сети капитальных и подготовительных выработок строго определенного по скорости прохождения воздушной струи поперечного сечения, что вызывает большие капитальные затраты на их проведение и поддержание.

В связи с этим для нормального функционирования любого угледобывающего предприятия, уменьшения себестоимости добываемого угля за счет проведения мероприятий по дегазации выемочных участков, регулирования эксплуатационных затрат на содержание шахтной сети горных выработок необходимо знание общих закономерностей взаимосвязанных процессов сдвижения и газоотдачи породного массива.

С использованием гипотезы С. Кнотте о единичном влиянии элементарного объема выработанного пространства В.И. Мякеньким [205] разработано математическое описание процесса распределения остаточного газового давления в под- и надрабатываемой толщах горных пород.

В соответствии с этой гипотезой вынуженный в пределах отработанной части пласта элементарный объем вызывает газоотдачу породного массива и падение в нем газового давления.

Получено уравнение для определения остаточного давления газа в любой точке земной поверхности, заданной координатами (x, y) в момент времени t для прямоугольной выработки с одной подвижной границей (лавой) и условий горизонтального залегания пластов (начало координат выбрано посередине разрезной печи, ось x направлена в направлении движения лавы, ось y – вдоль лавы:

$$P_o(x, y, t) = \frac{P_{\text{ГПР}}}{4} \left[\begin{array}{l} 4 - \left(1 - \frac{1}{n} \ln \frac{N}{N - \frac{z}{m}} - k_0 \right) \times \\ \times \left\{ \Phi \left[A(S_2 + y) \right] + \Phi \left[A(S_2 - y) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ \Phi \left[A(vt - d - x) \right] + \Phi \left[A(d - x) \right] \right\} \end{array} \right], \quad (12.28)$$

где $P_0(x, y, t)$ - остаточное газовое давление в верхнем или нижнем относительно разрабатываемого пласта полупространстве; $P_{пр}$ - природное давление в заданной координатами (x, y) точке породного массива; n - некоторый коэффициент, учитывающий характер изменения относительного газового давления в подработанных слоях с удалением по нормали от разрабатываемого пласта, равный 2,85-3,5; N - радиус газового дренирования (для подработываемой части толстых пластов равен 120, для надработываемой части равен 45 м; z - расстояние по нормали от разрабатываемого пласта, м; m - мощность разрабатываемого пласта (для надработываемой толщи принимается равным 1), м; k_0 - эмпирический коэффициент, учитывающий остаточное давление газа в угле, выданного на поверхность, равный 0,025.

Практическое применение уравнения (12.17) представлено на рис. 12.8 в виде прогнозного графика газового давления при отработке лавы воркутинской шахты № 40.

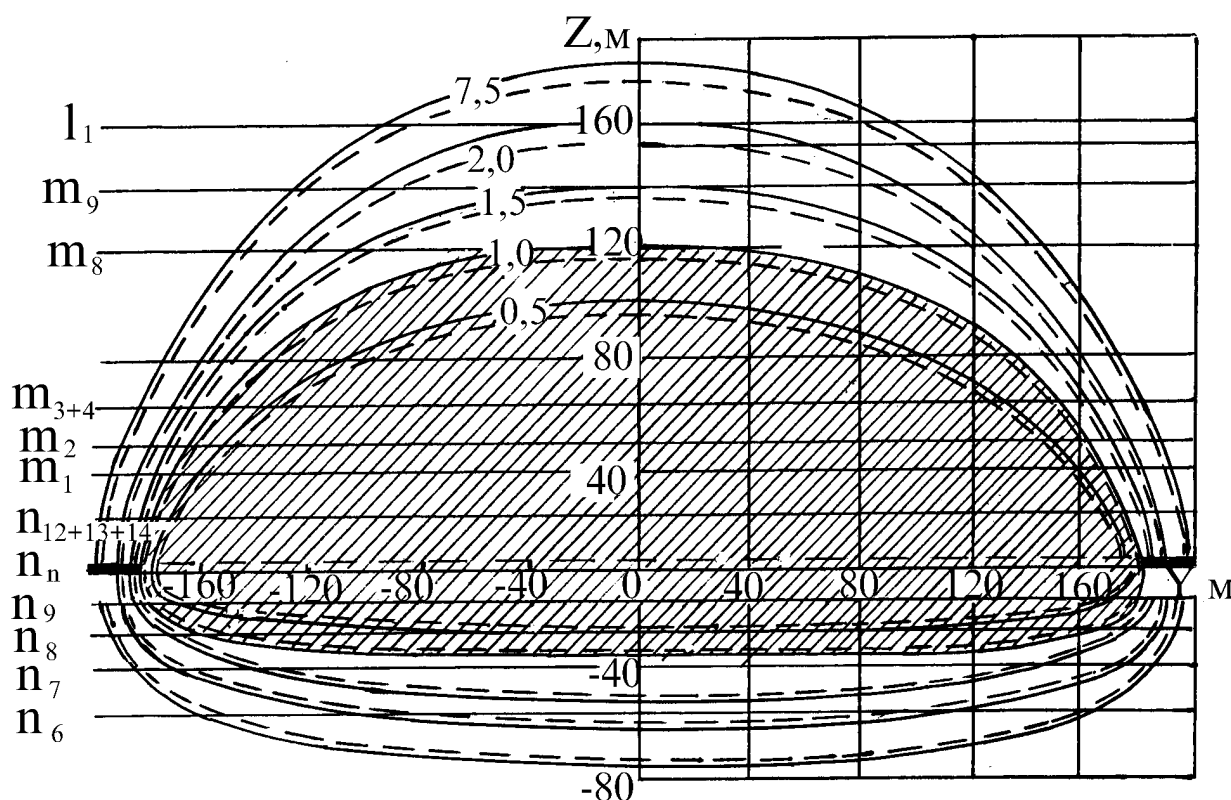


Рис. 12.8. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (штриховые) изолинии остаточного газового давления в над- и подработанных пластах шахты № 40 (Воркута)

Полученные решения позволили решить задачи газовой динамики под- и надрабатываемых угольных пластов, выработанных пространств: выполнять расчеты защищенных зон по газовому фактору, снижения газообильности угольных пластов и пород под влиянием очистной выработки, распределения источников газовой выработки и концентрации метана по площади выработанного пространства, газового баланса добычных участков и др.

Контрольные вопросы и задания

1. Что называют сдвижением горных пород и земной поверхности?
2. Что такое область и мульда сдвижения?
3. Какими параметрами характеризуется мульда сдвижения при полной и неполной подработке?
4. Какие параметры используют для характеристики деформаций земной поверхности?
5. Как влияют условия разработки месторождения на характер деформаций земной поверхности?
6. Какие зоны сдвижения образуются при деформации земной поверхности?
7. Какие математические модели используют для описания процесса образования мульды?
8. Как связана газоотдача угольных пластов с процессами сдвижения подрабатываемой толщи пород?
9. Для чего необходимо вести прогноз оседаний земной поверхности?
10. Какие инженерные мероприятия используют для управления процессом оседания земной поверхности?